



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
– MESTRADO –**

**BIORREATOR DE MEMBRANAS DE ULTRAFILTRAÇÃO APLICADO
AO TRATAMENTO DE EFLUENTE INDUSTRIAL: AVALIAÇÃO DA
EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO E POTENCIAL DE REÚSO DA
ÁGUA**

Por

Amanda Paiva Farias

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Mestre*

JOÃO PESSOA – PB

SETEMBRO - 2017



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

– MESTRADO –

**BIORREATOR DE MEMBRANAS DE ULTRAFILTRAÇÃO APLICADO
AO TRATAMENTO DE EFLUENTE INDUSTRIAL: AVALIAÇÃO DA
EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO E POTENCIAL DE REÚSO DA
ÁGUA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

Amanda Paiva Farias

Orientador: Prof. Dr. Gilson Barbosa Athayde Júnior

JOÃO PESSOA – PB

SETEMBRO - 2017

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F224b Farias, Amanda Paiva.
 Biorreator de membranas de ultrafiltração aplicado ao
 tratamento de efluente industrial: avaliação da eficiência de
 tratamento e potencial de reúso da água / Amanda Paiva Farias. -
 João Pessoa, 2017.
 116 f. : il.

 Orientador: Gilson Barbosa Athayde Júnior.
 Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT

 1. Engenharia civil e ambiental. 2. Biorreator de Membranas -
 Eficiência. 3. Efluentes industriais - Tratamento. I. Título.

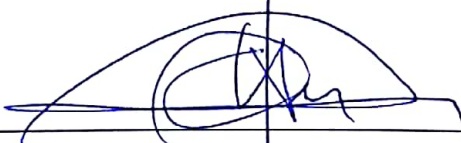
UFPB/BC

AMANDA PAIVA FARIAS

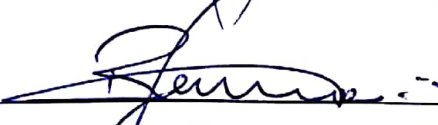
**BIORREATOR DE MEMBRANAS DE ULTRAFILTRAÇÃO APLICADO
AO TRATAMENTO DE EFLUENTE INDUSTRIAL: AVALIAÇÃO DA
EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO E POTENCIAL DE REÚSO DA
ÁGUA**

Dissertação aprovada em 04/09/2014 como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

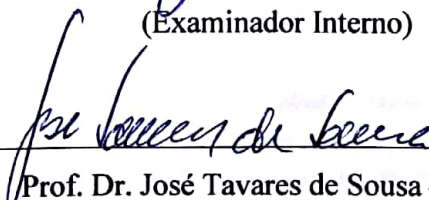
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Gilson Barbosa Athayde Júnior – UFPB
(Orientador)



Prof. Dr. Rennio Félix de Sena – UFPB
(Examinador Interno)



Prof. Dr. José Tavares de Sousa – UEPB
(Examinador Externo)

Dedico a Deus por tantas graças concedidas, aos meus pais Geraldo e Jordânia e minhas irmãs Ana Carolina e Beatriz pela formação do meu caráter e educação, ao meu noivo Cláudio pelo estímulo desde o primeiro passo dado. Além da paciência nos dias mais difíceis e presença sempre constante e fundamental de vocês em minha vida. Enfim, dedico a vocês por todo amor que nos envolve e nos mantém unidos, sem vocês não teria chegado até aqui.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Pai Celestial pelo dom da vida, e por ter me proporcionado esta oportunidade ímpar, que tanto me ajudou e me fez crescer tanto na vida profissional quanto na pessoal. Por todos os momentos vividos dou graças a Ele;

Agradeço à minha família. Especialmente aos meus amados pais Geraldo e Jordânia, e as minhas irmãs, Ana Carolina e Beatriz, que sempre me deram total suporte e incentivo para que eu persistisse na concretização dos meus sonhos, confiando que eu seria capaz de alcançar mais esta conquista na minha vida. Foram pacientes, e descontraídos quando necessário e assim, contribuíram da melhor forma que podiam em cada etapa vivida ao longo dessa caminhada nada fácil. Obrigada por serem meu porto seguro, e os maiores exemplos de amor, perseverança e união. E hoje, sou o que sou graças à abençoada presença de cada um de vocês em minha vida;

Ao meu amado noivo, Cláudio, por me incentivar e apoiar desde a inscrição, sem medir esforços pela busca constante do nosso crescimento e futuro. Por acreditar que seria capaz de chegar onde cheguei, pela confiança depositada a cada dia, pela paciência, compreensão, carinho e amor, permitindo que o passar dos dias fossem mais leves. Esta conquista também é sua;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gilson B. Athayde Júnior, pela orientação, partilha de conhecimentos, paciência, compreensão e amizade, além da confiança depositada para a realização desta pesquisa;

Ao Prof. Dr. Rennio F. de Sena pelas contribuições com esta pesquisa, pelos ensinamentos, paciência, solicitude e por aceitar o convite para participar da comissão examinadora deste trabalho;

Ao Prof. Dr. José Tavares de Sousa por aceitar o convite para participar da comissão examinadora deste trabalho, pela atenção, sugestões e críticas propostas com o intuito de aprimorar a pesquisa desenvolvida;

Ao Prof. Dr. Raul Rosenhaim por ter cedido o laboratório para o desenvolvimento da pesquisa e pela disponibilidade em ajudar;

As amigas Daiana e Wanessa pelas conversas, conselhos, momentos de descontração e de estudos. Agradecimento especial a Daiana por ter compartilhado comigo diariamente das angústias da pesquisa e da difícil vivência distante de casa, sempre me ajudando a superar cada dificuldade encontrada;

Aos amigos do LCA e do LaCom, de forma especial a Wendell, Gabriela, Juliana, Alexandre, Jean, Simone, Ester, Fernanda, Diogo e Andreanne que dispuseram sempre a ajudar nos momentos em que precisei;

Aos amigos Breno, Pablo, Raquel e Raul, grupo do sucesso, que de forma especial estavam presentes em cada etapa dessa dissertação, sempre na torcida para que tudo ocorresse da melhor forma possível;

A UFPB, ao PPGECAm pela oferta do mestrado que tanto tem a acrescentar na área profissional e pela estrutura que permitiu o desenvolver dessa pesquisa;

A todos os funcionários da instituição, pela dedicação e disponibilidade em contribuir com a formação de tantos que passam pela UFPB;

Aos colegas do PPGECAm em especial a turma de 2015, pela partilha de conhecimentos ao longo da caminhada;

A Capes pela bolsa concedida, sem a qual não seria possível a minha manutenção nesse mestrado;

A FINEP pelo financiamento do Projeto Bramar;

A EnviroChemie pelo fornecimento do BRM e pela parceria;

A Intrafrut pela parceria realizada, fundamental para a realização desta pesquisa.

RESUMO

O elevado índice de crescimento populacional observado ao longo dos anos reflete em uma maior demanda de água. Por esse recurso natural não ser encontrado de forma homogênea na natureza, torna-se escasso em muitas regiões, assim a disputa pelo seu uso é uma das consequências. Diante do delicado cenário, é de grande relevância a adoção de medidas que proporcionam a conservação da água nas diversas atividades. O setor industrial é responsável por grande parte do consumo de água potável, mantendo a proporção para a geração e consequentemente lançamento de efluentes. Com isso, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a eficiência da utilização do Biorreator de Membranas (BRMs), como uma tecnologia que proporciona uma melhor eficiência ao tratamento de efluentes industriais, por meio de substituição ou combinação dessa nova tecnologia ao tratamento convencional. Para isso o efluente foi caracterizado por meio de parâmetros físico-químicos. Foi instalado no LaCom um biorreator de bancada com capacidade total de 12 L, contendo uma placa plana de uma membrana de ultrafiltração, sendo preenchido com efluentes até os 10 L, afim de verificar a eficiência de remoção e o comportamento de alguns parâmetros ao longo do tratamento biológico realizado. As análises realizadas foram de pH, Sólidos Sedimentáveis, Sólidos Suspensos Totais (SST), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Biológica de Oxigênio (DBO). Com a caracterização do efluente e do permeado, foi possível calcular as médias para cada parâmetro analisado, além das eficiências alcançadas dos sólidos suspensos totais com 92,4%, DQO analisada com o Pastel UV obtendo 96,5%, DQO analisada de forma convencional chegando a 99% e DBO de 92,2%. Os resultados obtidos permitiram verificar e comprovar a eficiência do tratamento desse tipo de efluente industrial por meio de uma membrana de ultrafiltração. A partir dessas análises e com a intensão de aplicar o reúso na indústria, foi concluído que o permeado saiu como o esperado, alcançando uma eficiência de remoção muito satisfatória, podendo ser reutilizado em alguns processos da indústria sempre levando em consideração o tipo de processo com a qualidade requerida. No entanto, as legislações e normas existentes deixam a desejar, quando abordam de forma superficial o reúso. Quando na verdade era para ser uma prioridade a ser discutida e aplicada nas indústrias ou em qualquer outro estabelecimento.

PALAVRAS-CHAVE: Efluente industrial. Biorreator de Membranas. Ultrafiltração. Reúso.

ABSTRACT

The exalted population growth rate observed through the years reflects a higher water demand. This natural resource is not found homogeneous in state of nature and it becomes scarce in many regions, so the dispute over its use is one of the consequences. Given the delicate scenario, it is very important to adopt actions that provides the conservation of water in various activities. The industrial sector is responsible for a large part of the consumption of drinking water, maintaining the proportion for the generation and consequently discharge of effluents. The aim of this study was to evaluate the efficiency of the use of the Membrane Bioreactor (MBR) as a technology that provides better efficiency in the treatment of industrial effluents by means of replacing or combining this new technology with the conventional treatment. The effluent was characterized by physical-chemical parameters for this purpose. The LaCom was equipped with a 12L bench-scale bioreactor containing a flat plate of an ultrafiltration membrane, filled with effluents up to 10 L, for the monitoring of the removal efficiency in the biological treatment carried out. The analyzes realized were pH, sedimentable solids, Total Suspended Solids (SST), Chemical Oxygen Demand (COD) and Biological Oxygen Demand (BOD). Through the characterization of the effluent and the permeated, it was possible to calculate the average value for each parameter analyzed and the efficiencies of this treatment for some of the parameters. Total suspended solids presented 92.4%, COD analyzed with Pastel UV revealed 96.5 %, COD conventionally analyzed reached 99% and BOD 92.2%. The results allowed to verify and to prove the efficiency of the treatment of this type of industrial effluent by means of an ultrafiltration membrane. From analyzes and with the intention of applying the reuse in the industry, it was concluded that the permeated came out as expected, achieving a very satisfactory removal efficiency. Moreover, it can be reused in some industrial processes, always taking into account the type of process with the required quality. However, existing legislation and standards superficially addresses the reuse. When in fact it would be a priority to be discussed and applied in industries or other establishment.

KEYWORDS: Industrial effluent. Membrane Bioreactor. Ultrafiltration. Reuse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquemática do Ciclo Hidrológico.	22
Figura 2 - Consumo de água doce.	25
Figura 3 - Tratamento de esgoto em nível primário	33
Figura 4 - Tratamento de esgoto em nível secundário.....	34
Figura 5 - Lodos Ativados - processo convencional	35
Figura 6 - Características dos processos de separação por membranas	39
Figura 7 - Esquema da morfologia da seção transversal de diferentes membranas.	44
Figura 8 – Representação esquemática do funcionamento de uma membrana semipermeável e o comportamento do fluxo na filtração convencional e tangencial.	45
Figura 9 – Desenho esquemático de uma membrana inorgânica com multicamadas.	46
Figura 10– Módulo de membranas com placas.	49
Figura 11– Módulos espirais	50
Figura 12 – Módulos tubulares.....	50
Figura 13 – Módulos com fibras ocas	51
Figura 14 – Módulo com discos giratórios.....	51
Figura 15 - Configuração do biorreator com módulo de membrana submerso.....	55
Figura 16 - Configuração do biorreator com módulo de membrana externa	56
Figura 17 – Esquema da sequência de eventos para formação do biofilme.	59
Figura 18 - Formas potenciais de reúso de água.	65
Figura 19 - Esquema do funcionamento da ETE.....	75
Figura 20 - Planta do funcionamento da ETE	75
Figura 21 - Esquema representado o MBR utilizado	77
Figura 22 - Imagens do Biorreator de bancada utilizado na pesquisa.	77
Figura 23 - Coleta do Efluente na Indústria de Processamento de Frutas	78
Figura 24 - Análises do Cone de Imhoff	80
Figura 25 - Pastel UV - SECOMAM	80
Figura 26 – Bloco digestor e equipamento de leitura das amostras - HACH.....	81
Figura 27 – Lavagem do BRM	82
Figura 28–Comportamento do pH durante o funcionamento do BRM	85
Figura 29 – BoxPlot da distribuição do pH no efluente que alimenta do BRM, do concentrado contido no lodo e do permeado.	86
Figura 30 – Sólidos Sedimentáveis	87

Figura 31 – BoxPlot do comportamento dos sólidos sedimentáveis no concentrado	88
Figura 32 – Sólidos Suspensos Totais	89
Figura 33 – Eficiência de remoção dos Sólidos Suspensos Totais.....	90
Figura 34 – Comparação entre os efluentes não filtrados e os filtrados nas análises de sólidos suspensos totais	91
Figura 35 – Distribuição da DQO utilizando o Pastel UV	92
Figura 36 - Boxplot da eficiência de remoção da DQO – Pastel UV	93
Figura 37 - Período de análises de DQO utilizando o Pastel UV em amostras sem filtração e com filtração	94
Figura 38 – BoxPlot da eficiência de remoção da DQO analisada através do equipamento Pastel UV para as amostras filtradas e não filtradas.....	95
Figura 39 - DQO analisada pelo método colorimétrico de refluxo fechado	96
Figura 40 – Eficiência de remoção de DQO entre os efluentes com e sem adição de nutrientes	96
Figura 41 – Distribuição da DBO utilizando o Pastel UV	98
Figura 42 – BoxPlot da eficiência de remoção da DBO no Pastel UV	99
Figura 43 - Gráfico da DBO com efluentes filtrados e não filtrados	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índice comparativo entre alguns países do consumo diário per capita de água	23
Tabela 2 - Associação entre os usos da água e os requisitos de qualidade.....	26
Tabela 3 -Estimativa da eficiência esperada nos diversos níveis de tratamento incorporados numa ETE	38
Tabela 4 – Processos de separação com membranas.....	42
Tabela 5 – Comparação das propriedades das membranas inorgânicas e orgânicas.....	43
Tabela 6 – Descrição sobre a morfologia das membranas.	44
Tabela 7 – Vantagens e desvantagens dos módulos de membranas submersos e externos	56
Tabela 8 - Classificação das águas e seus principais usos.....	69
Tabela 9 - Classes e parâmetros de reúso	71
Tabela 10 - Tabela com as análises realizadas.	79
Tabela 11 – ANOVA do pH.....	87
Tabela 12 - ANOVA dos SST	90
Tabela 13 – DQO analisada através do Pastel UV	93
Tabela 14 – ANOVA da DQO no Pastel UV	94
Tabela 15 – ANOVA da DQO convencional	97
Tabela 16 – ANOVA da DBO no pastel UV	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AIJN – European Fruit Juice Association

ANA – Agência Nacional de Águas

ANOVA – Análise de Variância

BRM – Biorreator de membrana

ClO₂ – Dióxido de Cloro

CT – Centro de Tecnologia

CCEN – Centro de Ciência Exatas e da Natureza

DBO – Demanda bioquímica de oxigênio

DQO – Demanda química de oxigênio

DS – Decantadores Secundários

ED – Eletrodiálise

ETE – Estação de tratamento de esgoto

HCl – Ácido clorídrico

H₂O₂ – Peróxido de Hidrogênio

ISO - International Organization for Standardization

LA - Lodos Ativados

LaCom – Laboratório de Combustíveis e Materiais

LCA – Laboratório de Carvão Ativado

MBAS – Methylene Blue Active Substances

MF – Microfiltração

NaOH – Hidróxido de sódio

NaCl – Cloreto de sódio

NBR – Norma Brasileira

NF – Nanofiltração

OI – Osmose Inversa

OMS – Organização Mundial da Saúde

ONU – Organização das Nações Unidas

OR – Osmose reversa

pH – potencial Hidrogeniônico

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

PSM – Processo de Separação por Membrana

PTM – Pressão Transmembrana

PVC - policloreto de vinil

QPC - *Quota Per Capta*

RPM – Rotação por minuto

SST – Sólidos Suspensos Totais

SSTA – Sólidos Suspensos Totais no Tanque de Aeração

TA – Tanque de Aeração

THRV – Tanque de Homogeneização e Regularização de Vazão

TIL – Tanque de Idade do Lodo

UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket

UF – Ultrafiltração

UFPB – Universidade Federal da Paraíba

UV – Ultravioleta

WHO – World Health Organization

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
2.	OBJETIVOS.....	20
3.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
3.1.	ESCASSEZ HÍDRICA.....	21
3.2.	USOS DA ÁGUA	24
3.2.1.	USOS DA ÁGUA NA INDÚSTRIA	27
3.3.	CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS EFLUENTES.....	28
3.3.1.	CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS EFLUENTES INDUSTRIAIS	29
3.4.	TÉCNICAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	31
3.5.	PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS (PSM)	40
3.5.1.	CLASSIFICAÇÃO DAS MEMBRANAS.....	42
3.5.2.	TIPOS DE FILTRAÇÃO	45
3.5.3.	CARACTERÍSTICAS DAS MEMBRANAS.....	46
3.5.3.1.	ESPESSURA.....	46
3.5.3.2.	POROSIDADE.....	47
3.5.3.3.	SELETIVIDADE	47
3.5.3.4.	PERMEABILIDADE.....	47
3.5.4.	TIPOS DE MEMBRANAS E MÓDULOS.....	48
3.5.5.	VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS	51
3.6.	BIORREATORES DE MEMBRANAS.....	53
3.6.1.	TIPOS DE BIORREATORES DE MEMBRANAS	54
3.6.1.1.	BRM COM MÓDULOS DE MEMBRANA SUBMERSA.....	54
3.6.1.2.	BRM COM MÓDULOS DE MEMBRANA EXTERNA.....	55

3.6.1.3.	VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS TIPOS DE MÓDULOS.....	56
3.6.2.	IMPORTANTES ASPECTOS DOS BRMS.....	57
3.6.2.1.	AERAÇÃO.....	57
3.6.2.2.	CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS.....	57
3.6.2.3.	PRESSÃO TRANSMEMBRANA.....	58
3.6.2.4.	PROCESSOS DE COLMATAÇÃO NOS BRMS.....	58
3.6.3.	PARÂMETROS OPERACIONAIS DOS BRMS.....	60
3.6.3.1.	POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH)	60
3.6.3.2.	TEMPERATURA	60
3.6.3.3.	IDADE DO LODO.....	61
3.6.3.4.	TEMPO DE DETENÇÃO HIDRÁULICA.....	61
3.6.4.	MECANISMOS QUE AUXILIAM NO CONTROLE DA COLMATAÇÃO.....	61
3.6.4.1.	DISPOSIÇÃO DA MEMBRANA E DIFUSORES DE AR.....	61
3.6.4.2.	PROCEDIMENTO DE RETROLAVAGEM	61
3.6.5.	LIMPEZA DA MEMBRANA	62
3.7.	REÚSO.....	62
3.7.1.	REÚSO NA INDÚSTRIA.....	66
3.8.	LEGISLAÇÃO E NORMATIZAÇÃO DO REÚSO	67
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	73
4.1.	A INDÚSTRIA.....	73
4.2.	A ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES (ETE).....	73
4.3.	USOS DA ÁGUA DA INDÚSTRIA	76
4.4.	REATOR DE BANCADA.....	76
4.5.	COLETA DE AMOSTRAS E MÉTODOS ANALÍTICOS	78
4.5.1.	COLETA DO EFLUENTE BRUTO E DO PERMEADO	78
4.5.2.	MÉTODOS ANALÍTICOS.....	78

4.6.	LIMPEZA DA MEMBRANA	81
4.7.	ANÁLISE DOS DADOS	82
4.7.1.	ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA.....	82
4.7.2.	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)	82
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
5.1.	CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE E PERMEADO	84
6.	CONCLUSÕES.....	101
7.	RECOMENDAÇÕES	102
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

1. INTRODUÇÃO

A água é um bem natural essencial à vida, assim como para o desenvolvimento social, econômico e ambiental. A mesma é um recurso renovável por meio do ciclo hidrológico, que é responsável pelo movimento da água entre os continentes, os oceanos e a atmosfera. Sua disponibilidade e distribuição não ocorrem de forma regular devido ao relevo, influências climáticas, hidrológicas, além das atividades antrópicas associadas ao crescimento demográfico e consequentemente aumento do consumo nos setores agrícolas, urbano e industrial. Assim, a crescente demanda pela água e seus usos múltiplos leva a uma variação intensa de efeitos, e consequentemente a poluição dos mananciais, interferindo numa crescente diminuição na disponibilidade e qualidade da água ofertada na natureza (TUNDISI, 2003).

Salati (2006) defende que a água é um fator limitante para o desenvolvimento sustentável, uma vez que prevê os usos dos recursos naturais renováveis de forma a não limitarem sua disponibilidade para gerações futuras. Logo, para alcançar o desenvolvimento sustentável, um dos maiores desafios a serem enfrentados será minimizar os efeitos da escassez hídrica e da poluição.

A escassez hídrica não pode ser mais considerada como atributo exclusivo de regiões áridas e semiáridas. Áreas com recursos hídricos abundantes, mas insuficientes para atender a demanda excessivamente elevada, também experimentam conflitos de usos e sofrem restrições de consumo que afetam o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida da população (HESPANHOL, 2003).

Esse quadro de escassez hídrica é agravado quando é constatada, simultaneamente, a deterioração dos mananciais utilizados para o abastecimento, em decorrência da falta de serviços de tratamento de águas residuárias, das falhas encontradas nas legislações e políticas de proteção de mananciais e da não observação das boas práticas agropecuárias (DOS SANTOS et al., 2006).

Com a realidade da escassez hídrica, faz-se necessário um programa eficiente de combate ao desperdício e a degradação da qualidade, aplicando os tratamentos necessários para cada tipo de efluente de acordo com as classes dos corpos hídricos que serão lançados, como também o incentivo a sustentabilidade objetivando a conscientização definitiva de que a água é um bem finito, vital e de grande valor econômico competitivo no mercado global,

iniciando assim, a busca principalmente por alternativas de reutilização de efluentes em diversas aplicações.

O setor industrial é responsável por grande parte do consumo de água potável, assim como também pela geração e lançamento de efluentes, onde em alguns casos chegam a ser despejados fora dos limites pré-estabelecidos em leis e resoluções. Por este motivo, o tratamento adequado para efluentes industriais vem se tornando uma preocupação real e cada vez mais presente, partindo da legislação vigente que obrigam as indústrias à atender os padrões exigidos, e da própria sociedade com a busca pela preservação ambiental, mais especificamente dos corpos hídricos que sofrem demasiadamente consequências dos despejos desses efluentes .

Giordano e Surerus (2015) afirmam que os efluentes industriais apresentam características muito específicas, que variam das características físico-químicas da água industrial, perdas das diversas matérias-primas e seus contaminantes, uma alta dosagem de produtos saneantes, perda de produtos industrializados e em alguns casos é possível identificar mistura com esgoto sanitário. Por estes motivos, é exigido um estudo de caracterização e quantificação, incluindo o conhecimento das variações de volumes gerados em cada etapa do processo produtivo, da potencialidade de toxicidade e dos diversos pontos de geração de efluentes para obter o correto dimensionamento da estação de tratamento de efluentes.

Para o tratamento de efluentes é comum o uso de tecnologias que utilizem processos físico-químicos, sistemas de lodos ativados (LA), lagoas de estabilização, filtros biológicos, dentre alguns outros. Durante o tratamento, para cada etapa, têm-se a redução da concentração de poluentes, de carga orgânica e toxicidade. Permitindo que, ao final de cada etapa de tratamento, as características devem ser compatíveis com as solicitadas pelos processos subsequentes.

Por mais que estes tratamentos de efluentes apresentem sucesso na eficiência do processo, estudos sobre tratabilidade de efluentes vêm sendo desenvolvidos e interferindo nas possibilidades de substituições ou combinações com novas tecnologias, proporcionando uma melhor qualidade ao efluente tratado, em algumas situações adequando este para o reúso. A exemplo de novas tecnologias, os Biorreatores de Membranas (BRMs) são segundo Giacobbo (2010), considerados variante dos processos microbiológicos, diferenciado pela membrana de nano, micro ou ultrafiltração que substitui o decantador secundário.

A tecnologia de biorreatores possui a função de degradar a matéria orgânica e mineral, e a membrana é responsável pela separação entre as fases sólida e líquida, sendo através deste processo a produção do permeado (efluente tratado). A popularidade desta tecnologia se dá nos casos em que há uma demanda por qualidade de efluente que supera a capacidade suportada pelos LA convencionais (RADJENOVIC et al., 2008).

Os empreendedores buscam por tecnologias que visam o reúso, devido principalmente à economia atribuída à indústria. Visto que a necessidade do uso destas tecnologias dá-se através do conjunto de informações desde cobrança do uso da água, até a destinação dos efluentes nos mananciais que acabam por incentivar o reúso da água, devido principalmente às limitações impostas pelos parâmetros de lançamento destes efluentes pelos órgãos ambientais.

De Almeida (2011) afirma que para a aplicação do reúso, faz-se necessário a regulamentação para a permissão dessa prática, de forma a garantir a qualidade da saúde do usuário e a preservação dos recursos hídricos e, conseqüentemente do meio ambiente.

Com este pretexto, é fundamental o estudo da utilização dos BRMs como alternativa para o tratamento de efluentes industriais e reúso da água. Assim como, a busca pela avaliação dos critérios de viabilidade técnica e econômica para a aplicação do sistema de reúso em uma indústria, devido à eficiência do processo e ao custo de implantação. Assim, para uma indústria alimentícia, tem-se como desígnio a utilização de estratégias de reúso de efluentes industriais excluindo o efluente sanitário, e voltando suas aplicações para o resfriamento e lavagens de máquinas, pisos, transportes, bacias sanitárias e rega de jardim, com o devido tratamento, alcançando o enquadramento aos padrões permitidos ao reúso e pela indústria de alimentos, levando em consideração as normas e legislações existentes.

A prática de reúso de efluentes fica mais restrita quando se refere a uma indústria alimentícia. Segundo Casani, Rouhany e Knochel (2005) é um desafio para as empresas e autoridades públicas, por ter que alcançar os padrões de qualidade, que são mais rigorosos no âmbito de parâmetros microbiológicos, físicos e químicos, para que não comprometa a segurança dos produtos.

2. OBJETIVOS

Objetivo Geral:

Avaliar a eficiência do biorreator de membrana (BRM) de ultrafiltração para tratamento biológico de efluentes de uma indústria de processamento de frutas.

Objetivos Específicos:

- ✓ Caracterizar qualitativamente o efluente gerado na indústria de processamento de frutas;
- ✓ Estimar a eficiência do tratamento avaliando a remoção de alguns parâmetros analisados;
- ✓ Monitorar o desenvolvimento da biomassa no biorreator;
- ✓ Avaliar a qualidade do permeado para o possível reúso;

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Com a finalidade de proporcionar uma melhor compreensão deste trabalho, este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica desenvolvida durante a pesquisa. Na sequência serão abordados alguns aspectos relacionados à escassez hídrica, aos usos da água mais especificamente na indústria, técnicas de tratamento de efluentes, os biorreatores e os processos de separação por membranas no tratamento de efluentes industriais, abordagem de alguns estudos de casos e as possibilidades de reúso segundo as normas brasileiras.

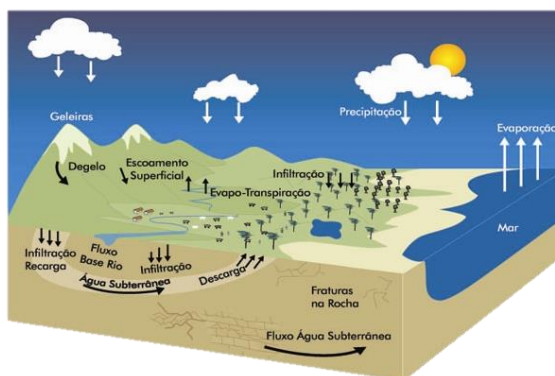
3.1. Escassez Hídrica

A água é um elemento vital presente na natureza e é a substância predominante em todos os seres vivos. Além de que a disponibilidade da água define estruturas e funções de um ambiente, sendo responsável pela sobrevivência da biota. Este é o componente responsável por um ciclo, mantido pela energia solar e pela atração gravitacional, que é capaz de manter a água no nosso meio, apresentando-se em vários estados físicos, de forma dinâmica (COSTA, 2010).

Por meio do ciclo hidrológico, a água é considerada um bem renovável e móvel, visto que é por meio das mudanças dos estados físicos, que a água se recicla na natureza. Por mais que o ciclo hidrológico seja único para todo o planeta, o volume de cada um de seus componentes variam nas diferentes regiões do planeta e por bacia hidrográfica (PIELOU, 1998). Os fluxos subterrâneos de água também variam, dependendo do tipo e velocidade da recarga, o que interfere na descarga dos rios.

A disponibilidade hídrica em qualquer região é variável quanto ao tempo e espaço, em função das condições climáticas de cada local e seu período do ano. Fatores como as atividades humanas interferem integralmente no quesito disponibilidade, por meio da demanda excessiva ou por problemas de poluição proveniente de lançamentos de efluentes domésticos ou efluentes industriais (MIERWZA e HESPANHOL, 2005).

Figura 1 - Esquematização do Ciclo Hidrológico.



Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2015)

Parte desta problemática deve-se ao crescimento populacional e urbanização que são pontos negativos na discussão da disponibilidade dos recursos naturais. A disponibilidade hídrica sofre alterações, sobretudo com o aumento do consumo habitacional e industrial, juntamente com a ampliação da área urbanizada que gera a impermeabilização das superfícies, mais a diversificação e intensificação dos usos da água como um recurso abundante e infinito acaba sobrecarregando os mananciais (ROCHA, PEREIRA, 2015).

O Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos de 2016 estima que mais de 1,4 bilhão de empregos, ou 42% do total da mão de obra mundial, são altamente dependentes dos recursos hídricos, incluindo empregos nas áreas de abastecimento de água e saneamento, pescas, mineração, extração de recursos, produção de energia, saúde, turismo e setores na gestão de ecossistemas. Também foi estimado que 1,2 bilhão de empregos, ou 36% da mão de obra mundial, são moderadamente dependentes dos recursos hídricos, em setores que não requerem o acesso a quantidades significativas, mas para as quais a água não deixa de ser um componente necessário, a exemplo de construções, recreação e transporte. O fator de escassez de água é limitante às oportunidades de crescimento econômico e criação de empregos, porém, o uso de infraestrutura e eficientes tecnologias podem prolongar o uso desse recurso, mesmo com o aumento do peso econômico da escassez hídrica devido a disputa pelos diversos usos da água.

Desde os anos de 1980, a captação de água doce vem aumentando 1% ao ano mundialmente. Pode-se notar que os maiores consumidores de águas, fazem parte do grupo de nações economicamente desenvolvidas, com destaque para os Estados Unidos da América, cuja média de consumo por cidadão (per capita) é duas vezes maior do que toda a Europa.

Registra-se também o papel dos países considerados emergentes (PENA, 2015). Segue a Tabela 1 com o consumo per capita de alguns países:

Tabela 1 - Índice comparativo entre alguns países do consumo diário per capita de água

<i>País</i>	<i>Consumo per capita (L/dia.hab)</i>
Estados Unidos	575
Itália	385
México	365
Noruega	300
Alemanha	195
Brasil	185
Índia	135
China	85
Gana	35
Etiópia/Haiti	15

(Fonte: ONU, s/d)

Muitas nações ficam abaixo do mínimo recomendado pela ONU, que é de 110 litros de água por dia, a exemplo da China que sofre com o seu elevado volume populacional possuindo uma área composta por grandes desertos.

Uma possível crise decorrente da escassez de água torna uma ameaça direta à humanidade. Tundisi (2005) afirma que a crise impõe dificuldades ao desenvolvimento, produz estresses econômicos e sociais, aumenta as desigualdades entre regiões e países, e aumenta a tendência de doenças de veiculação hídrica. Segundo informações do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2004) estimam que 2,4 bilhões de pessoas não têm acesso ao saneamento básico, mais de 1,1 bilhão, distribuídas em 31 países, não têm acesso à água potável e aproximadamente 1,6 milhões de pessoas morrem anualmente proveniente da falta de água e saneamento básico. Estima-se que em 2050, um quarto da população mundial provavelmente viverá em países com problemas de escassez crônica de água (CASTRO & SCARIOT, 2005).

O Brasil possui 13% da água doce disponível do planeta, distribuída de forma desigual onde 81% dessa água doce ficam concentradas na Região Hidrográfica Amazônica, que possui o menor contingente populacional, aproximadamente 5% da população brasileira. Enquanto que na região hidrográfica banhada pelo Oceano Atlântico que concentra 45,5% da população brasileira, está disponível apenas 2,7% dos recursos hídricos (ANA, 2015).

É perceptível uma grande variação na disponibilidade hídrica nas regiões brasileiras, resultados esses atrelados principalmente devido à influência climática e intensidade de ocupação do solo de cada região. Entretanto, a escassez hídrica faz parte do cenário brasileiro, não por depender exclusivamente dos climas desfavoráveis como é o caso das regiões áridas e semiáridas, mas também das regiões altamente urbanizadas, incluindo os casos das regiões em que abrigam quantidade considerável de água doce, porém as dificuldades de exploração para esse recurso ou até mesmo a falta de estrutura saneante torna-o escasso. A disponibilidade hídrica chegando algumas vezes a ser colocado com um problema social de grande magnitude em certas áreas do espaço regional.

Assim, em meio a “tanta” água a “crise hídrica” chama atenção, pois está relacionada com a má distribuição de recursos naturais no espaço em relação à concentração populacional, uma vez que os fluxos de água são caracterizados de acordo com o clima e as condições geológicas de evapotranspiração e escoamento. Apesar destes fatores, o consumo excessivo de água e a ineficiência no uso destes recursos ameaçam a disponibilidade hídrica, por conseguinte o abastecimento da população, interferindo no ciclo hidrológico global.

Por estes motivos é importante a criação de estratégias que ajustem o uso da água nas atividades humanas à ideia de que estes recursos não são abundantes no país (HESPANHOL, 2005). Abrindo uma discussão para a reformulação de conceitos sobre os usos da água, tratamento e descarte dos efluentes gerados. Tornando essencial a prática de racionalização do uso e de reúso para garantir a continuidade das atividades humanas mesmo diante do cenário de escassez hídrica.

3.2. Usos da água

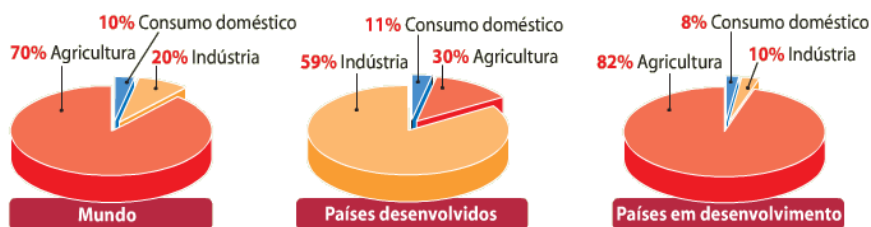
Os impactos das atividades humanas no ciclo hidrológico e na qualidade das águas derivam dos usos múltiplos das atividades humanas referentes a este recurso natural. Como o consumo de água nas diversas atividades humanas variam muito, além de depender da concentração da população, da economia regional e das atividades agrícolas e industriais, os impactos não são iguais e apresentam diferentes proporções sobre cada componente do ciclo hidrológico e sobre a qualidade da água (TUNDISI, 2006).

Von Sperling (2005), Marengo (2008) e Costa (2010) avaliam os principais usos da água em basicamente abastecimento doméstico, industrial e irrigação, variando para a

preservação da fauna e flora, uso recreativo, navegação, geração de energia elétrica, dentre outras atribuições.

Os usos da água podem variar entre países, de acordo com a disponibilidade hídrica, e incentivos culturais, econômicos e políticos de cada local. A Figura 2 esquematiza os usos de água doce a nível mundial e entre os países desenvolvidos e em desenvolvimento, comprovando a variação desses valores por meio de incentivos que vêm apoiando a aplicação de tecnologias sustentáveis proporcionando alterações significativas na demanda de água nesses setores, comprovando que a conscientização varia de acordo com a condição cultural.

Figura 2 - Consumo de água doce.



Fonte: Water for People, Water for Life, UNESCO, 2003 (adaptado).

Von Sperling (2005) na Tabela 2 faz uma associação dos usos específicos da água para com a qualidade requerida. Enfatizando que a qualidade da água, quando necessária passando por um tratamento, deve atingir os requisitos dos diversos usos previstos.

Tabela 2 - Associação entre os usos da água e os requisitos de qualidade

Uso geral	Uso Específico	Qualidade Requerida
Abastecimento de água doméstico	-	<ul style="list-style-type: none"> • Isenta de substâncias químicas prejudiciais à saúde; • Isenta de organismos prejudiciais à saúde; • Adequada para serviços domésticos; • Baixa agressividade e dureza; • Esteticamente agradável (baixa turbidez, cor, sabor e odor; ausência de macrorganismos).
Abastecimento industrial	Água é incorporada ao produto (ex: alimento, bebidas, remédios)	<ul style="list-style-type: none"> • Isenta de substâncias químicas prejudiciais à saúde; • Isenta de organismos prejudiciais à saúde; • Esteticamente agradável (baixa turbidez, cor, sabor e odor).
	Água entra em contato com o produto	<ul style="list-style-type: none"> • Variável com o produto.
	Água não entra em contato com o produto (ex: refrigeração, caldeiras)	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa dureza; • Baixa agressividade.
Irrigação	Hortaliças, produtos ingeridos crus ou com casca	<ul style="list-style-type: none"> • Isenta de substâncias químicas prejudiciais à saúde; • Isenta de organismos prejudiciais à saúde; • Salinidade não excessiva.
	Demais plantações	<ul style="list-style-type: none"> • Isenta de substâncias químicas prejudiciais ao solo e às plantações; • Salinidade não excessiva.
Dessedentação de animais	-	<ul style="list-style-type: none"> • Isenta de substâncias químicas prejudiciais à saúde dos animais; • Isenta de organismos prejudiciais à saúde dos animais.
Preservação da flora e da fauna	-	<ul style="list-style-type: none"> • Variável com os requisitos ambientais da flora e da fauna que se deseja preservar.
Aquicultura	Criação de animais	<ul style="list-style-type: none"> • Isenta de substâncias químicas prejudiciais à saúde dos animais e dos consumidores; • Isenta de organismos prejudiciais à saúde dos animais e dos consumidores; • Disponibilidade de nutrientes.
	Criação de vegetais	<ul style="list-style-type: none"> • Isenta de substâncias químicas tóxicas aos vegetais e aos consumidores; • Disponibilidade de nutrientes.
	Contato primário (contato direto com o meio líquido. Ex: natação, surfe, esqui)	<ul style="list-style-type: none"> • Isenta de substâncias químicas prejudiciais à saúde; • Isenta de organismos prejudiciais à saúde; • Baixos teores de sólidos em suspensão e óleos e graxas.
Recreação e lazer	Contato secundário (não há contato direto com o meio líquido. Ex: navegação de lazer e pesca)	<ul style="list-style-type: none"> • Aparência agradável.
Geração de energia	Usinas hidrelétricas	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa agressividade.
	Usinas nucleares ou termelétricas (ex: torres de resfriamento)	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa dureza.
Transporte	-	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa presença de material grosseiro que possa por em risco as embarcações.

Fonte: Adaptado por Von Sperling (2005).

3.2.1. Usos da água na Indústria

A água é um recurso imprescindível na indústria, e deve estar disponível em quantidade e qualidade necessárias para atender a cada uso específico, podendo cumprir vários papéis em uma mesma indústria.

O consumo de água na indústria é influenciado por vários fatores que variam desde a disponibilidade hídrica e condições climáticas da região, quanto com o ramo da atividade, a capacidade e método de produção, as tecnologias instaladas da indústria e até mesmo a cultura da empresa e da comunidade na qual se encontra.

Nordell (1961); Shreve; Brink Jr. (1980); Nalco (1988); Silva (1999); Simões (1999) apud Mierzwa e Hespanhol (2005) apontam as seguintes aplicações da água na indústria:

- **Matéria-prima:** a água é incorporada ao produto final. O grau de qualidade da água varia, podendo apresentar características equivalentes ou superiores às águas para o consumo humano, uma vez que visa à proteção da saúde dos consumidores finais, assim como garantir a qualidade final do produto;
- **Uso como fluido auxiliar:** na preparação de soluções, reagentes químicos, como veículo ou em operação de lavagem. O grau de qualidade utilizada também depende do processo destinado, podendo ser mais restritivo ou não;
- **Uso para geração de energia:** esse uso transforma a energia cinética, potencial ou térmica acumulada na água em energia mecânica e em energia elétrica. O grau de qualidade da água vai depender do processo de geração de energia em questão, para que os equipamentos não sejam danificados e não comprometa o sistema;
- **Uso como fluido de aquecimento e/ou resfriamento:** água usada para aquecer (forma de vapor), para resfriar quando necessário, já que a elevação de temperatura pode comprometer o desempenho do sistema e danificar os equipamentos. Quando na forma de vapor o grau de qualidade deve ser alto, quando fluido de resfriamento ou aquecimento, o grau de qualidade pode ser menos restritivo, a depender do equipamento que entrará em contato com essa água;
- **Transporte e assimilação de contaminantes:** enquadra nas instalações sanitárias, lavagem de equipamentos e instalações, ou na incorporação de subprodutos sólidos, líquidos e gasosos, gerados pelos processos industriais. Como pode comprometer o resultado final do produto, as características da água devem atender ao uso da

mesma. Para a limpeza de equipamentos, pode ser exigido um grau de pureza elevado, a depender do processo em que o equipamento se enquadra.

Muitos requisitos de qualidade para o uso de água na indústria variam os limites recomendados de seus parâmetros, inclusive para evitar problemas associados à qualidade da água, como principalmente a corrosão e incrustação em tubulações de refrigeração. Além de que o grau de qualidade da água para um determinado uso hoje pode ser diferente do que tenha sido padrão no passado (NORDELL (1961) apud MIERZWA e HESPANHOL (2005)), ou que venha a ser no futuro. A busca pela otimização do uso da água na indústria é intensa, ainda mais quando tem a busca pela diminuição de produtos químicos para proteger os componentes que a água entrará em contato e assim reduzir a quantidade de toxicidades dos efluentes gerados. Permitindo que a água seja reutilizada em outras atividades industriais menos exigentes, simplificando o sistema de tratamento desses efluentes.

3.3. Características gerais dos Efluentes

Segundo Jordão e Pessoa (2005), os efluentes costumam serem classificados em dois grupos os efluentes sanitários e os industriais:

- Os efluentes sanitários são compostos por uma parcela de águas pluviais, águas de infiltração (ocorrem por meio de defeitos em tubos, conexões, juntas, paredes de poços de visita) e despejos domésticos, neste, incluindo os efluentes de residências, de instituições e comércio, desde que contenham instalações de banheiros, lavanderias, cozinhas, ou usos domésticos das águas, caracterizados por águas de banho, urina, fezes, papel, restos de comidas, sabão, detergentes e águas de lavagem, apresentando uma propriedade bem definida.
- Os efluentes industriais são compostos por despejos provenientes de qualquer utilização da água para fins industriais, assim, adquirem características próprias em função ao processo industrial empregado, logo, cada indústria deverá ser considerada separadamente até mesmo as de processos semelhantes, pois apresentam efluentes diferentes.

As características dos efluentes variam quantitativamente e qualitativamente de acordo com a sua utilização.

Quantitativamente são levantados os valores de vazão doméstica calculada com base no consumo de água local, sendo em função da população de projeto, do valor de consumo

médio diário de água por indivíduo (*Quota Per Capta* - QPC), do coeficiente de retorno (vazão de esgoto/ vazão de água) e das variações de vazão (máxima e mínima). Os valores de taxa de infiltração são calculados com base na vazão pela extensão da rede coletora ou área servida, ou por dados específicos locais. Para a vazão industrial, deve-se obter o conhecimento do consumo de água discriminado quanto aos usos, produções de despejos, pontos e regime de lançamentos (METCALF & EDDY, 1991; SPERLING, 1995).

A característica dos efluentes é em função aos usos de que a água foi submetida, e variam quanto ao clima, situação econômica e social e hábitos da população. A característica dos efluentes quanto a sua qualidade se dá através do uso de parâmetros físicos, químicos e biológicos.

Os autores Von Sperling (1995), e Jordão & Pessoa (2005) apresentam algumas características para os parâmetros físicos, químicos e biológicos dos efluentes. Para os parâmetros quanto às características físicas são determinados: temperatura, odor, cor, turbidez e matéria sólida. Quanto aos parâmetros de características químicas são designados: matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, pH, alcalinidade, cloretos, óleos e graxas. Já com os parâmetros de características biológicas enquadram-se: bactérias, fungos, protozoários, vírus e helmintos.

3.3.1. Características gerais dos Efluentes Industriais

Durante a utilização das águas pelas indústrias ocorrem contaminações por diversos resíduos, e comumente provocam alterações na temperatura, gerando assim, o efluente líquido industrial. Os parâmetros utilizados para análise devem significar e descrever as características de cada atividade industrial (GIORDANO E SURERUS, 2015).

Os mesmos caracterizam os efluentes industriais como sendo diretamente relacionadas à composição das águas de abastecimento e às perdas de matérias-primas e produtos no processo industrial. Além das características físico-químicas e microbiológicas comumente citadas, os efluentes apresentam características organolépticas, odor e cor, e físicas, temperatura e os sólidos:

- O odor pode ser atribuído pelo próprio efluente industrial bruto, ou pela carência nos processos anaeróbios ou aeróbios, estes são provocados pelas reações de fermentação, emissões de aminas pela decomposição de proteínas, emissões de substâncias com aromas das indústrias farmacêuticas, de essências e fragrâncias,

emissões de solventes das indústrias de tintas, refinarias de petróleo e emissão de amônia;

- A cor pode ser classificada como real (compostos solúveis) ou aparente (além dos compostos solúveis, os coloides). Os principais componentes geradores de cor são os corantes (naturais ou sintéticos), pigmentos e produtos de oxidação e a variação do pH do meio;
- A temperatura é um parâmetro que quantifica ganhos e perdas de energia, originários do processo industrial. São importantes fontes de poluição dos corpos hídricos. Esta afeta a resistência dos materiais, os equipamentos utilizados nas medições de processo, a solubilidade dos gases e os processos biológicos;
- Os sólidos são aplicados para o dimensionamento e controle de ETE industriais. Estes quantificam as substâncias e materiais, suspensos e dissolvidos (orgânicas ou inorgânicas). As análises de sólidos não permite a identificação direta da composição química, mas agrupa materiais e substâncias.

Giordano e Surerus (2015) descrevem as características dos efluentes por tipologia industrial, descrevendo os principais poluentes, parâmetros, processos e etapas de tratamento comprovadamente eficientes. Dentre as tipologias: indústria de alimentos (laticínios, margarina, sorvete, pescado, abatedouros e frigoríficos), indústria de bebidas (sucos, cervejeira e refrigerante) e indústrias de transformação (têxtil, tintas, farmacêutica de formulação e de síntese, metalúrgica, mineradoras e petróleo).

Dentre estas, devido à aproximação com o tipo de indústria em estudo, em se tratar de processamento de frutas, destaca-se a indústria de sucos. Esses efluentes constituem de resíduos de frutas, óleos essenciais da casca das frutas, resíduos defensivos agrícolas, águas de lavagem contendo resíduos do suco, cascas, caroços e sementes. Consideram-se como principais poluentes os açúcares, corantes naturais, óleos essenciais da própria fruta, pesticidas, cascas, polpas, sementes ou caroços e produtos de limpeza. Dentre os parâmetros usuais destaca-se: DQO, DBO, detergente (MBAS), sólidos suspensos; sólidos suspensos voláteis, sólidos sedimentáveis, pH e cor. E as duas etapas de tratamentos são:

- Primeira etapa: peneiramento;
- Segunda etapa: clarificação físico-química com flotação;
- Terceira etapa: processo biológico aeróbio de lodo ativado; desaguamento mecanizado de lodo.

ou

- Primeira etapa: peneiramento;
- Segunda etapa: lagoa anaeróbia seguida de lagoa aerada aeróbia ou facultativa com leito de secagem de lodo.

3.4. Técnicas de Tratamento de Efluentes

O efluente sanitário até recentemente, era lançado indiscriminadamente em rios. No entanto, com a evolução da legislação ambiental, as operadoras vêm sendo obrigadas a destinar adequadamente estes resíduos. Levantamento realizado pelo Instituto Trata Brasil, no Brasil em 2015, 83,3% da população são abastecidas por água tratada, sendo 35 milhões de brasileiros sem acesso a esse serviço básico. A coleta de esgoto sanitário atendeu apenas cerca de 50,3% da população, porém apenas 42,67% desses eram tratados. Por maior que tenha sido o investimento em saneamento básico nos últimos anos, os avanços foram poucos e de forma desproporcional as regiões brasileiras.

É de extrema importância que a administração pública tenha um sistema de esgotamento sanitário atendendo a 100% das residências, do comércio e das indústrias, composto por redes coletoras, com interceptores e emissários devidamente executados, resultando em um sistema de tratamento de águas residuárias adequado. Para isto é fundamental um planejamento e uma construção eficiente e que seja adequado para cada cidade (NUVOLARI; COSTA, 2010).

Haja vista que o esgoto é composto por 99,9% de água e uma pequena parcela de impurezas (0,1%), o tratamento de esgoto tem como objetivo a busca pela remoção dessas impurezas, baseando nos parâmetros normatizados exigidos pela legislação que regula a qualidade do efluente final e variando com o volume a ser tratado, a sua finalidade, o nível de processamento, as qualidades originais e pretendidas, e locais de lançamento ou reaproveitamento.

As principais literaturas que são referências nos processos de tratamento de esgoto são: Metcalf e Eddy (1991); Von Sperling (1996, 1997 e 2005); Chernicharo (1996); Mancuso e Santos (2003) e Nuvolari (2003). Nos quais trazem os tipos de tratamentos, os objetivos, importância e tecnologias utilizadas em cada etapa do tratamento.

Em um processo de tratamento de esgoto convencional há duas fases: a fase líquida, que busca remover os sólidos presentes e clarificar o efluente final; e a fase sólida, que se resume ao lodo produzido. Atualmente, especialmente devido ao problema de escassez hídrica

parte do efluente tratado também tem sido utilizado como água de reúso, após passar por tratamento complementar necessário para atingir a qualidade requerida.

Nuvolari e Costa (2010) elencam pontos a serem buscados no tratamento de esgoto:

- A remoção de sólidos presentes: dos grosseiros por gradeamento, da areia nas caixas de areia, de óleos e graxas e sólidos sedimentáveis (por gravidade) nas unidades de sedimentação primária;
- A remoção da matéria orgânica biodegradável contida nos sólidos finamente particulados e nos sólidos dissolvidos em: lagoas aeradas, lagoas de estabilização, lodos ativados, filtros biológicos, filtros anaeróbios de fluxo ascendente e reatores anaeróbios de fluxo ascendente;
- A remoção de patogênicos: em lagoas de maturação, por disposição no solo ou por diversas formas de desinfecção;
- A remoção de nitrogênio: por nitrificação e desnitrificação biológica, disposição no solo ou por processos físico-químicos;
- A remoção de fósforo: por processos biológicos ou físico-químicos ou por disposição no solo.

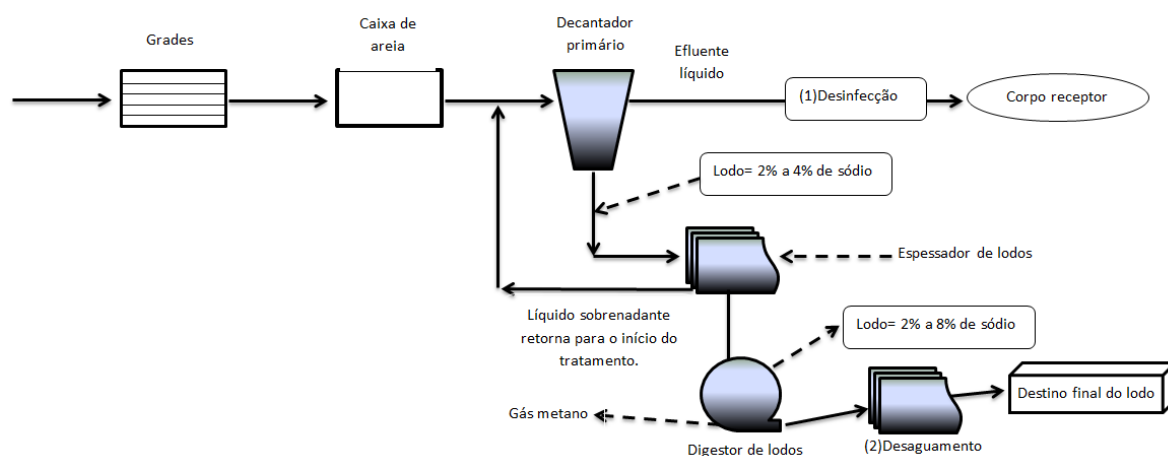
Von Sperling (1995) classifica o tratamento de esgoto sanitário incluindo três tipos de tratamentos sequenciais indispensáveis: o tratamento prévio ou preliminar, para a remoção dos sólidos muito grosseiros e a areia; o tratamento primário, com remoção de sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica; e o tratamento secundário (ou biológico), que remove matéria orgânica e ocasionalmente nutrientes. E quando necessário um tratamento terciário ou avançado para remover poluentes específicos e partículas que não foram removidas nos processos anteriores.

No tratamento prévio ou preliminar as unidades de tratamento utilizadas são: gradeamento, com barras metálicas paralelas e igualmente espaçadas que retêm os sólidos grosseiros em suspensão, para proteger as tubulações, bombas e equipamentos de obstruções e entupimentos; caixa de areia funciona com a velocidade de escoamento controlada permitindo a sedimentação das partículas protegendo as bombas contra abrasão, evitando entupimentos e depósitos de materiais nos decantadores e digestores; e tanque para remoção de óleos e graxas (NUVOLAI, 2003).

O tratamento primário consiste na passagem do esgoto, por uma unidade de sedimentação e disposição do lodo. Nos tanques de sedimentação primária ou clarificadores são realizadas a remoção de sólidos sedimentáveis, nesta etapa o esgoto flui vagarosamente,

permitindo que os sólidos em suspensão cheguem gradualmente ao fundo, por ação da gravidade (sedimentação simples) ou por precipitação química (adição de produtos químicos coagulantes e de floculação), sendo este último não recomendável devido ao acréscimo do volume de lodo. O lodo gerado nesta etapa segue para a digestão, secagem e disposição. A Figura 3 esquematiza o tratamento do esgoto em nível primário.

Figura 3 - Tratamento de esgoto em nível primário



Observações:

- (1) A operação de desinfecção pode ou não ser feita.
- (2) O desaguamento pode ser feito em leitos de secagem ou através de equipamentos mecânicos (filtro-prensa; prensa desaguadora; centrífugas, etc.) Neste caso, trona-se necessário adicionar produtos químicos para auxiliar a separação líquido-sólido.

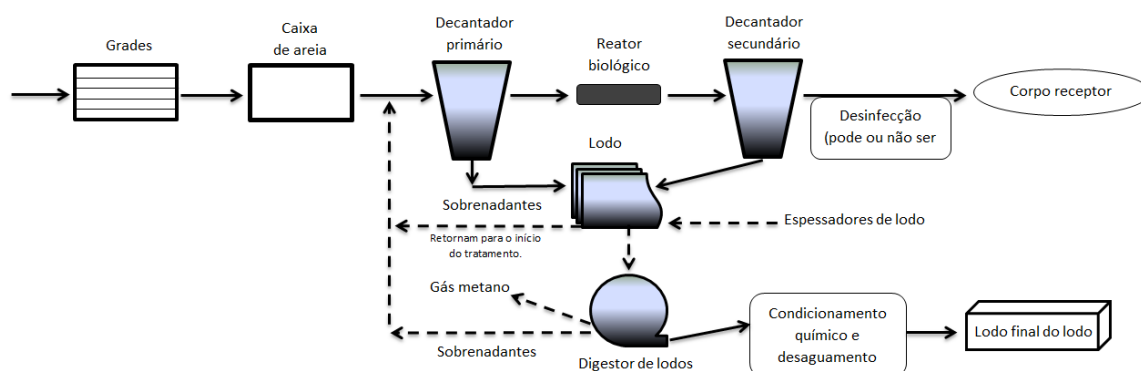
Fonte: Nuvolari; Costa, 2010.

No tratamento secundário ou biológico trata-se da remoção da matéria orgânica biodegradável contida nos sólidos dissolvidos, ou particulados, e uma pequena parcela de nutrientes. Esta etapa ocorre através de processos biológicos aeróbios ou anaeróbios seguidos da sedimentação final.

Nuvolari e Costa (2010) defende que em um tratamento biológico, as reações ocorrem entre os microrganismos e o material orgânico localizados nos tanques de aeração, devido a utilização da matéria orgânica como alimento pelos microrganismos, convertendo em água, gás carbônico e material celular (lodo secundário). Nesta etapa o decantador secundário além de responsável pela separação dos sólidos em suspensão, efluente clarificado e sólido decantados, é fundamental para o processo de lodos ativados, devido a retenção do

material sólido advindo do tanque de aeração (TA), o lodo ativado, sendo parte recirculada para o tanque de aeração e outra descartada. Ao final deste tratamento, pode-se fazer a desinfecção do efluente final, com cloro, ozônio, UV, H_2O_2 , e outras substâncias que reduzam o número de patógenos presentes no efluente tratado. Todas as etapas estão esquematizadas na Figura 4.

Figura 4 - Tratamento de esgoto em nível secundário



Fonte: Nuvolari; Costa, 2003.

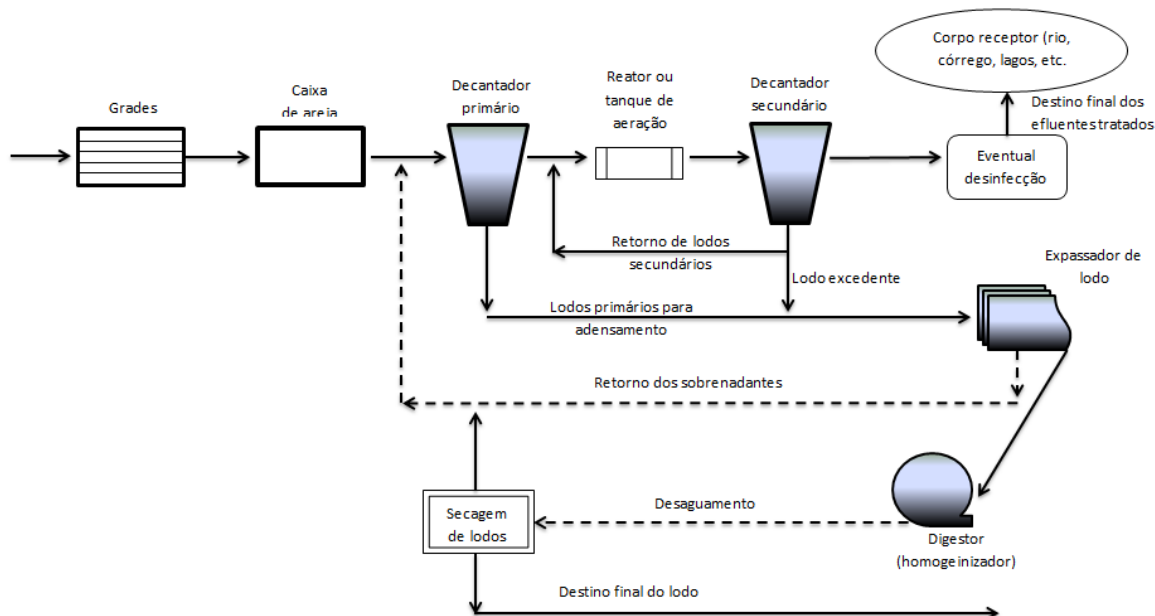
Os processos biológicos ocorrem em função da oxidação da matéria orgânica. Estes processos podem ser: aeróbios, envolve a ação de bactérias aeróbias, com introdução de oxigênio processo aplicada em lodos ativados e lagoas aeradas; ou ainda anaeróbios, com a ação de bactérias que sobrevivem na ausência de oxigênio, sendo aplicados em reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB), filtros anaeróbios de fluxo ascendente, digestores de lodo e tanques sépticos, há geração de gases, que pode produzir energia, porém há pouca geração de lodo.

Existem vários tipos de tratamentos biológicos, para a escolha do tipo de tratamento deve ser levando em consideração a vazão e a carga orgânica do efluente a ser tratado, a qualidade final a ser alcançada, a área disponível de implantação do projeto, a disponibilidade econômica, dentre outros fatores. Os tipos encontrados para o tratamento biológico são: lodos ativados, filtros biológicos, lagoa de estabilização, biodiscos, reator anaeróbio de fluxo ascendente, filtro anaeróbio de fluxo ascendente, fossa séptica, tanque Imhoff e tanque tipo OMS, sumidouros e vala de infiltração.

Nos lodos ativados, Figura 5, o controle e a eficiência do processo está baseado na recirculação do lodo para o tanque de aeração. Requer uma menor área que as lagoas, porém necessita de um alto grau de mecanização e um elevado consumo de energia. O sistema

possui uma alta eficiência, e permite um reduzido tempo de detenção hidráulica. Sua eficiência chega a faixa de 90 - 98% de remoção de DBO.

Figura 5 -Lodos Ativados - processo convencional



Fonte: Nuvolari; Costa, 2003.

O filtro biológico trata-se de um leito de percolação da biomassa que permanece aderida a um material de enchimento, favorecendo a formação de biomassa aderida responsável por adsorver a matéria orgânica e as bactérias promover uma digestão mais lenta. É considerado um processo aeróbio, devido aos espaços vazios do material que constitui o leito. Este filtro pode perder a capacidade filtrante ao longo do tempo, devido ao crescimento da biomassa que ocupará os vazios, diminuindo as dimensões dos vazios e aumentando a velocidade que o efluente percorre (FEC/UNICAMP, 2016). A eficiência de remoção de DBO chega a 75 – 90%.

A lagoa de estabilização é considerada um tratamento muito eficiente, principalmente para pequenas comunidades, em função da área requerida. Exige poucos equipamentos para manutenção, as condições climáticas são fundamentais na eficiência deste tratamento. Estas são compostas por verdadeiras lagoas sequenciadas: lagoas facultativas, sistemas de lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas, lagoas aeradas facultativas, sistemas de lagoas aeradas de mistura completa seguida por lagoa de sedimentação, e lagoas de maturação.

A lagoa facultativa é baseada nos processos naturais de autodepuração, o efluente entra na lagoa e permanece nela por tempo de detenção hidráulica previamente calculado no projeto, garantindo que o esgoto sofra os processos biológicos de estabilização por meio da incidência solar que favorece a ação das algas na superfície e enquanto que no fundo da lagoa ocorre a sedimentação dos sólidos por meio da digestão anaeróbia. A sua eficiência pode alcançar um perfil de 70 a 90 % na remoção de DBO, com períodos de 15 a 20 dias de detenção.

As lagoas anaeróbias devem ser dimensionadas em uma menor área e possuir profundidades de 3 a 5 metros, a fim de minimizar a entrada de oxigênio para que ocorra a estabilização da matéria orgânica em condições anaeróbias.

As lagoas de maturação chegam a possuir profundidade de 0,8 a 1,5m e sua principal função é remover os organismos patogênicos. Por este motivo, a penetração de raios solares são fundamentais, além do pH elevado e concentração de oxigênio dissolvido. É considerado um método barato quando comparado a métodos de desinfecção por cloração (CASAN, 2002).

A lagoa aerada é utilizada quando se deseja um sistema totalmente aerado, havendo a necessidade de introdução de equipamentos eletromecânicos e complexa manutenção operacional do sistema, elevando o consumo de energia elétrica. Von Sperling (1996) ressalta que quando a lagoa facultativa opera no limite de sua capacidade e não há opções de expandir a sua área para tal solução, a conversão desta em lagoa aerada pode ser uma solução.

As lagoas aeradas de mistura completa são seguidas por lagoas de sedimentação possuem sólidos em suspensão na massa líquida e estes não podem ser lançados no corpo receptor, por este motivo segue a lagoa de sedimentação para sedimentar e estabilizar estes sólidos suspensos, os tempos de detenção hidráulica de cada lagoa respectivamente é de 2 a 4 dias e 2 dias. Como o acúmulo de lodo nas lagoas de sedimentação é baixo, a sua remoção é feita em intervalos de 1 a 5 anos.

O tratamento por biodiscos é semelhante ao por filtro biológico, o que difere são discos que giram, ora expondo a superfície ao líquido, ora ao ar, e sua limitação a pequenas vazões (SPERLING, 2005). Este efeito contribui para a oxigenação do meio, e quando há o crescimento da biomassa, ela se desgarra do disco e permanece em suspensão no meio líquido, onde devido ao movimento gerado há contribuição para o aumento da eficiência do processo (UNICAMP, 2002).

No reator anaeróbio de fluxo ascendente a biomassa cresce dispersa no meio, o efluente entra por baixo do reator e possui fluxo ascendente, no topo do reator há uma

estrutura cônica ou piramidal para a separação de gases resultantes no processo anaeróbio. Possui uma área requerida muito reduzida, possui baixa produção de lodo, e este já sai estabilizado (VON SPERLING, 1995).

O filtro anaeróbio de fluxo ascendente é uma opção para pequenos núcleos habitacionais. É considerado uma alternativa para o tratamento de efluentes de fossas sépticas, e consiste em um tanque preenchido com material variado para a formação de filme biológico responsável pela decomposição da matéria orgânica, sendo sustentado por uma laje perfurada. É um processo anaeróbio, e possui dimensões reduzidas e unidade fechada (VON SPERLING, 2005).

A unidade de fossa séptica é responsável pela sedimentação de sólidos e pela retenção de material graxo, fazendo função de decantador primário e do digestor de lodos. Há neste sistema a sedimentação de 60 a 70% dos sólidos contidos nos esgotos, a parte não decantada são as escumas (óleos, graxas e gorduras) que ficam a superfície livre do líquido, há ainda a possibilidade de maus odores. A sua eficiência é baixa, por conter muito organismos patogênicos, como coliformes termotolerantes, possuindo uma elevada DBO (UNICAMP, 2002). Necessita-se de tratamento para a disposição final de fossas sépticas como sumidouros, valas de filtração e filtros anaeróbios.

Os sumidouros são utilizados para pequenas vazões e consiste no lançamento e infiltração dos esgotos domésticos no subsolo, dimensões e eficiências variam com a capacidade de absorção do terreno em que é construída as paredes de alvenaria de tijolos com anéis ou juntas livres. E as valas de infiltração permite a percolação do esgoto através do solo, permitindo a mineralização destes antes que contaminem as águas subterrâneas e superficiais. Enquanto que a Vala de filtração é composta por canalizações com camadas de pedra e areia, sendo uma opção de tratamento de do efluente da fossa séptica ou do filtro anaeróbio de fluxo ascendente antes do destino num corpo d'água receptor.

No tratamento terciário (avançado) é utilizado técnicas de remoção de impurezas, e de partículas que não foram removidas após os tratamentos já citados (preliminar, primário e secundário). Geralmente é constituído por unidades de tratamento físico-químico que tem como finalidade a remoção complementar da matéria orgânica e de compostos biodegradáveis, de nutrientes, de poluentes tóxicos e/ou específicos de metais pesados, de sólidos em suspensão remanescentes, e de patogenias por desinfecção dos esgotos tratados (NUVOLARI, COSTA 2010).

Por Nuvolari e Costa (2010) os principais processos de tratamento de efluentes líquidos a nível terciário são:

- Remoção de sólidos dissolvidos: osmose reversa; troca iônica; eletrodialise reversa; evaporação;
- Remoção de sólidos suspensos: macrofiltração; microfiltração; Ultrafiltração; nanofiltração; clarificação (ozonização);
- Remoção de compostos orgânicos: ozonização; carvão ativado;
- Desinfecção: cloro; ozônio; dióxido de cloro (ClO₂); permanganato de potássio; cloramidas; radiação ultravioleta; entre outros meios.

Com base nos estudos realizados, a Tabela 3 mostra uma estimativa de eficiência dos diversos níveis de tratamento numa ETE.

Tabela 3 -Estimativa da eficiência esperada nos diversos níveis de tratamento incorporados numa ETE

<i>Tipo de tratamento</i>	<i>Matéria orgânica (% remoção de DBO)</i>	<i>Sólidos em suspensão (% remoção SS)</i>	<i>Nutrientes (% remoção nutrientes)</i>	<i>Bactérias (% remoção)</i>
Preliminar	5 – 10	5 – 20	Não remove *	10 – 20
Primário	25 – 50	40 – 70	Não remove *	25 – 75
Secundário	80 – 95	65 – 95	Pode remover	70 – 90
Terciário	40 – 99	80 – 99	Até 99	Até 99,999

*Não remove os nutrientes que estão na forma dissolvida ou finamente particulada. Os nutrientes incorporados nas partículas de lodo são removidos nos decantadores.

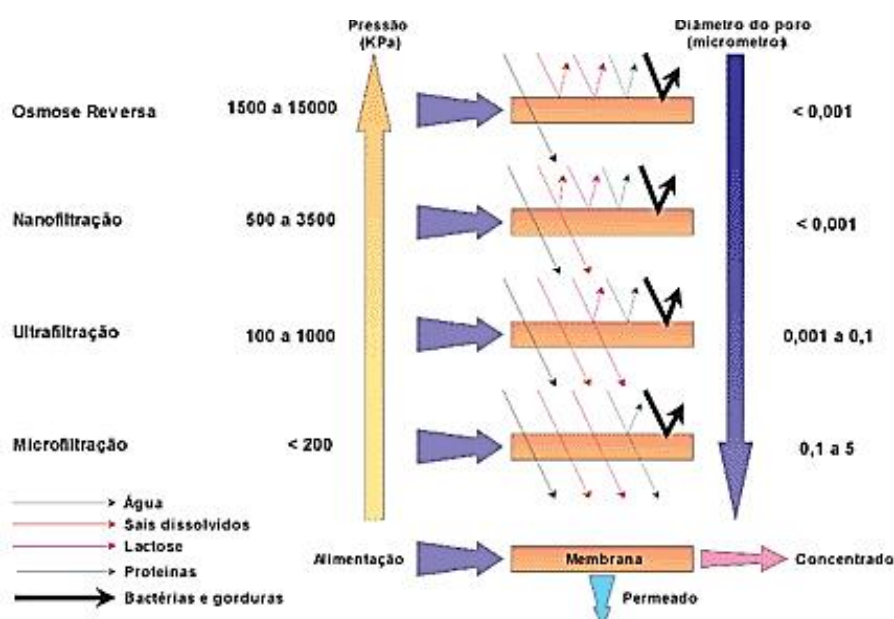
Fonte: Cetesb, 1988.

O tratamento de efluentes industriais de processamento de frutas, adaptando de Giordano e Surerus (2015), normalmente são constituídos de resíduos de frutas, inclusive óleos essenciais da casca das frutas, resíduos de defensivos agrícolas, águas de lavagem contendo resíduo do suco, cascas, caroços e sementes. Além desta composição, os principais poluentes encontrados no efluente são os açúcares, corantes naturais e produtos de limpeza que ainda assim permitem que os processos tradicionais de tratamento (lodo ativado, lagoa anaeróbia seguida de lagoa aerada aeróbia ou facultativa com leito de secagem de lodo) alcancem boas eficiências de remoção, permitindo que o descarte dos efluentes tratados atinjam os parâmetros exigidos pela legislação.

O tratamento por membranas são alvos nas aplicações de reúso de águas em indústrias; tratamento de lixiviado de aterro sanitário; e até na purificação da água (GIORDANO e SURERUS, 2015). A filtração com membranas é atualmente o processo de maior desenvolvimento na indústria. Geralmente são atérmicos, não envolvem mudança de fase; não necessitam de aditivos químicos (a depender da característica do efluente); são simples em conceito e operação; são modulares e apresentam facilidade para a realização da ampliação de escala (scaleup); exigem um baixo consumo de energia; apresentam um uso racional de matérias-primas e recuperação de subprodutos (DRIOLI E ROMANO, 2001).

Os reatores com a membrana submersa almejam a retenção de flocos biológicos e partícula coloidais. As membranas de micro e ultrafiltração são utilizadas após a decantação final para obter um efluente com baixa turbidez, as de nanofiltração removem substâncias orgânicas de massa molecular superior a 200 Dalton, reduzindo a cor, concentração de matéria orgânica (DQO) e toxicidade dos efluentes. A Figura 6 caracteriza os processos de separação por membranas, relacionando os diâmetros dos poros como o material retido (concentrado) pela membrana durante o tratamento.

Figura 6 - Características dos processos de separação por membranas



Fonte: Mierzwa, Hespanhol, 2005.

A ultrafiltração é um processo de separação por membranas no qual uma solução contendo macromoléculas é forçada contra uma membrana que permite a passagem do solvente e retém o soluto macromolecular. A ultrafiltração possui uma grande variedade de aplicações, incluindo purificação de água, processamento de leite e sucos, bem como o

tratamento de efluentes (PEPPIN E ELLIOT, 2001; BRIÃO E TAVARES, 2012). Partindo destas considerações, este presente trabalho realizou testes utilizando um biorreator de membrana de ultrafiltração de bancada como tratamento do efluente da indústria de processamento de frutas.

3.5. Processo de Separação por Membranas (PSM)

Um dos maiores desafios da ciência está na busca pelo desenvolvimento de novas tecnologias, capazes de transformar produtos de acordo com as especificações desejadas. A partir de 1970 surge em adição aos processos clássicos de separação, uma nova classe de processos que utilizam as membranas sintéticas com o intuito de reproduzir o efeito causado pelas membranas naturais, como a seletividade e permeabilidade peculiar, dividindo o fluxo em duas porções: retido ou concentrado e permeado (MONTEGGIA & DE LUCA, 2003).

Habert (2006) afirma que processos como diálise e microfiltração são conhecidos e utilizados em pequena escala desde 1930, devido à elevada espessura das membranas e por apresentarem baixos fluxos permeados. Descobertas importantes como a osmose inversa, por Reid e Breton (1953) através de membranas homogêneas de acetato de celulose que retinham sais e a técnica de reparo de membrana (inversão de fase por imersão-precipitação), por Loeb e Sourirajan (1960-1962) que permitiam o aumento do fluxo do permeado, mantendo elevada a retenção de sais, permitiram a expansão e aperfeiçoamento dessas técnicas.

Já no final da década de 50, os PSM começaram a serem designados como projetos de pesquisa nos EUA, com o objetivo de dessalinização das águas do mar. No início dos anos 60, foi iniciada a comercialização da tecnologia de membranas, no sistema de osmose reversa para este mesmo propósito. Como variação dessa tecnologia, surge outros tipos de membranas na década de 80, a nanofiltração, que é capaz de operar com pressões menores. Começou a ser utilizada na Noruega para a remoção de cor em águas derivadas de materiais vegetais parcialmente decompostos, assim como na Flórida para a remoção de dureza nas águas subterrâneas. Estes dois segmentos representaram pequenas divisões dentro dos sistemas utilizados no tratamento de água e efluente, no saneamento básico (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001).

A cada década, novos avanços na tecnologia de membranas se tornam mais funcionais e conseqüentemente mais presentes. Nos anos 90, foi lançado no mercado as membranas de separação de partículas (microfiltração e ultrafiltração) utilizadas na

hemodiálise, assim como no tratamento de água em escala comercial. O aprimoramento dos sistemas de membranas favoreceu a viabilidade de projetos com essas tecnologias como alternativas mais econômicas, pelo ponto de vista energético, dos sistemas convencionais de tratamento de água em grande escala. Abrindo possibilidades de aplicação no campo das separações industriais, no processo de água para consumo humano e no tratamento de efluentes industriais (MAESTRI, 2007; MASSOTA, MIETTON-PEUCHOTA, MILISICA, 2008; GUO et al.2010).

Segundo Maestri (2007), o objetivo principal das membranas é a separação de substâncias com diferentes propriedades, como tamanho, forma, difusibilidade, dentre outros. A funcionalidade da membrana resume em um conjunto de métodos e propriedades associados ao transporte de matéria por meio de materiais com permeabilidade seletiva, sendo uma barreira que contém permissividade para transferir matéria entre os dois meios que a membrana separa.

Assim, o processo de separação por membranas pode ser compreendido como uma operação unitária em que divide o fluxo de alimentação em: permeado, contendo o material que passou pela membrana, e o concentrado, composto pelo material que não transpassou a membrana (MANCUSO; SANTOS, 2003).

Segundo Streit (2011), os sistemas de separação com membranas são divididas em três categorias que se diferenciam de acordo com a força motriz do processo:

- Processos cuja força motriz é o gradiente de pressão: há diferença de pressão através das membranas que são classificadas em função dos tamanhos dos poros: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI);
- Processos cuja força motriz é o gradiente de concentração: pervaporação, permeação de gases, e diálises;
- Processos cuja força motriz é o gradiente de potencial elétrico: há uma aplicação de um campo elétrico para que ocorra a migração dos íons e assim a separação por meio da membrana íon-seletiva: eletrodiálise (ED).

A seguinte tabela apresenta algumas características dos principais processos de separação com membranas (SCOTT, 1997).

Tabela 4 – Processos de separação com membranas

<i>Processo</i>	<i>Força Motriz</i>	<i>Material Retido</i>	<i>Material Permeado</i>	<i>Força Propulsora</i>
Microfiltração	ΔP (0,5 – 2atm)	Material em suspensão	Água e sólidos dissolvidos	Pressão hidrostática
Ultrafiltração	ΔP (1 – 7atm)	Colóides e macromoléculas	Água e sais solúveis	Pressão hidrostática
Nanofiltração	ΔP (5 – 25atm)	Colóides, macromoléculas e íons divalentes	Água e sais solúveis	Pressão hidrostática
Osmose Inversa	ΔP (15 – 80atm)	Todo material solúvel ou em suspensão	Água (solventes)	Pressão hidrostática
Diálise	ΔC	Moléculas PM>5000	Íons e orgânicos de baixo PM	Gradiente de concentração
Eletrodiálise	ΔE	Co-íons	Contra-íons	Potencial elétrico
Permeação de Gases	ΔP , ΔC	Gás menos permeável	Gás mais permeável	Gradiente de concentração

Fonte: Scott (1997).

3.5.1. Classificação das Membranas

De modo geral, as membranas podem ser classificadas de acordo com a sua natureza e estrutura ou morfologia. Quanto à natureza, as membranas se dividem em biológicas (vivas ou não vivas) e sintéticas (orgânicas ou inorgânicas). As biológicas são essenciais para a manutenção e integridade física das células, enquanto que as sintéticas são fabricadas. As orgânicas são constituídas comumente por polímeros e os inorgânicos por materiais cerâmicos ou metais, possuindo estes um maior tempo de vida útil, relacionados a durabilidade quanto a manutenção e limpeza, além de uma alta estabilidade térmica. Quanto a forma estrutural, as membranas podem ser simétricas (porosas ou não porosas/densas) com espessura de 100 a 200µm e as assimétricas são constituídas por uma camada densa homogênea, bastante fina, variando de 0,1 até 0,5µm, suportada por uma camada porosa variando de 50 até 150µm

(PROVENZI, 2005; SOUSA, 2008). A tabela 5 mostra uma comparação das propriedades inorgânicas e orgânicas.

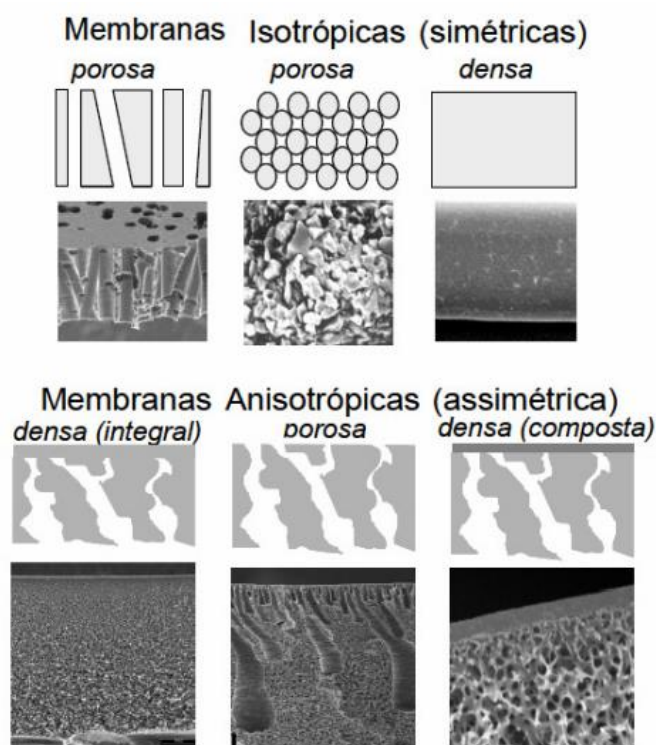
Tabela 5 – Comparação das propriedades das membranas inorgânicas e orgânicas.

<i>Propriedade</i>	<i>Membrana inorgânica</i>	<i>Membrana orgânica</i>
Aplicação	MF, UF	MF, UF, NF, RO
Resistência térmica		Acetato de Celulose < 40°C
	Cerâmicas < 250°C	Polisulfona < 90°C
	Carvão/grafite < 180°C	Aramida < 45°C
	Aço < 400°C	Policrolonitrila < 60°C
		Polipropileno < 70°C
Faixa de pH	0 - 14	Maioria dos polímeros: 2 – 12
		Acetato de celulose: 4,5 < pH < 6,5
Resistência mecânica	Boa	Média a ruim, necessitam de suporte.
Tolerância a materiais oxidantes	Boa	Depende do polímero, tempo de contato e concentração do oxidante (a maioria dos polímeros não resiste a ação de oxidantes).
Compactação	Não	Sim
Vida útil	10 anos	5 anos

Fonte: Cardot, 1999

Habert (2006) classifica as membranas quanto ao material que constitui as diferentes regiões na seção transversal da membrana, desde o filme superficial denso até a parte porosa. Quando é constituída pelo mesmo material, a membrana é integral, caso contrário é composta. Ainda classifica quanto às características morfológicas ao longo da sua espessura como isotrópicas ou simétricas para as que são mantidas ao longo de toda a espessura, e anisotrópicas ou assimétricas para as que possuem características diferentes como é mostrado a seguir (Figura 7).

Figura 7 - Esquema da morfologia da seção transversal de diferentes membranas.



Fonte: Habert, Borges e Nóbrega (1997)

Características das membranas isotrópicas e anisotrópicas (Maestri, 2007).

Tabela 6 – Descrição sobre a morfologia das membranas.

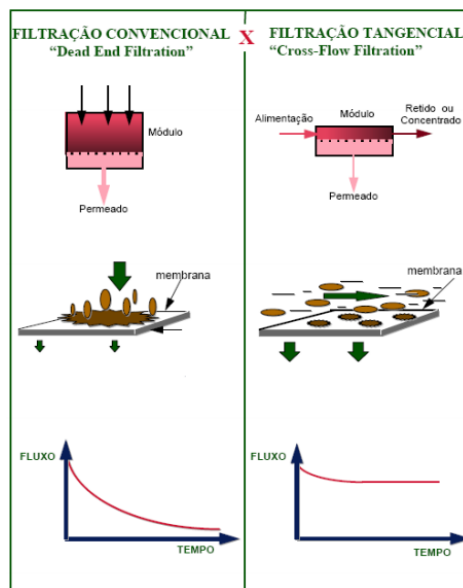
<i>ISOTRÓPICAS</i>	<i>ANISOTRÓPICAS</i>
Possui pouco fluxo do permeado, devido as grandes perdas de cargas provenientes da larga espessura. Uma curta duração de vida útil, devido aos efeitos da hidrólise e das bactérias. São orgânicas e pertence à primeira geração.	<p>Possuem boas propriedades mecânicas e um melhor fluxo de permeado. Resistem às bactérias e às reações químicas, porém, não suportam altas temperaturas e valores extremos de pH. São integrais e pertencem à segunda geração.</p> <p>*Com o avanço nas tecnologias surgiu a terceira geração, sendo composta, possuindo uma membrana filtrante, como um filme fino, por cima do suporte (membrana assimétrica)</p>

Fonte: adaptação Lacoste (1992) apud Lapolli (1998)

3.5.2. Tipos de Filtração

O modo de operação dos processos com membranas é muito diferente do modo de operação de separação por filtração convencional, na qual a alimentação é realizada perpendicularmente a membrana, o fluxo permeado é transpassado pela membrana e os solutos (concentrados) ficam retidos e acumulam na superfície da membrana (colmatação), podendo haver a necessidade de interrupções durante o processo para a limpeza ou até mesmo a substituição do meio filtrante devido à formação de uma torta (lodo). Durante a separação com membranas de forma tangencial, a alimentação escoia paralelamente à superfície da membrana, o permeado é transportado transversalmente à mesma, minimizando o acúmulo de soluto na superfície (MINHALMA, 2001), proporcionando uma filtração mais eficiente (PROVENZI, 2005). A figura 8 abaixo esquematiza o funcionamento da membrana semipermeável.

Figura 8 – Representação esquemática do funcionamento de uma membrana semipermeável e o comportamento do fluxo na filtração convencional e tangencial.



Fonte: Minhalma, 2001.

Porém, segundo Maestri (2007), mesmo com a filtração tangencial é perceptível um decréscimo contínuo do fluxo permeado ao longo do tempo. A queda deste fluxo é atribuída ao *fouling*, que pode ser entendido como o conjunto de fenômenos capazes de provocar uma queda no desempenho da membrana com o tempo.

Os principais fenômenos que contribuem para formação do *fouling* são:

- Adsorção de partículas na superfície da membrana e/ou no interior de seus poros devido a interações entre os solutos presentes na solução a ser tratada e o material que compõe a membrana;
- Altas concentrações de soluto na superfície da membrana podem causar sua precipitação formando uma camada gel sobre a membrana o que gera o bloqueio dos poros da membrana.

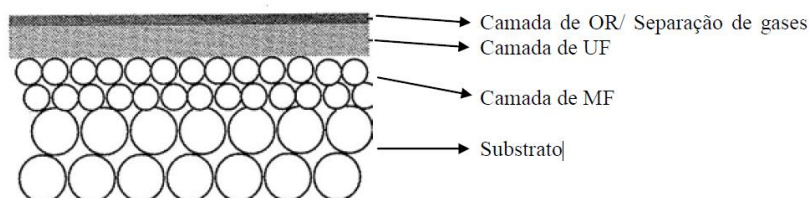
3.5.3. Características das Membranas

As características das membranas são fundamentais aos processos de separação. Dentre as características existentes, Pelegrin (2004) destaca como mais importante: espessura, porosidade, seletividade e permeabilidade.

3.5.3.1. Espessura

Quando apresentada mesma característica morfológica, a espessura da subcamada é proporcional a sua resistência ao fluxo e inversamente proporcional a taxa de permeação. Com o objetivo de aumentar a resistência das membranas nas indústrias, é necessário um suporte macroporoso. Assim, a nova resistência apresentada pelas membranas é sempre inferior a da subcamada. Dessa forma, a camada filtrante, a subcamada e o suporte macroporoso funcionam com resistências decrescentes e em série (PELEGRIN, 2004). A figura abaixo esquematiza as multicamadas de uma membrana.

Figura 9 – Desenho esquemático de uma membrana inorgânica com multicamadas.



Fonte: Muldes, 2003.

3.5.3.2. Porosidade

A porosidade é a relação existente entre a parte sólida e os poros da membrana, podendo ser incluído os vazios contidos em sua estrutura (PETRUS, 1997). A porosidade pode ser considerada apenas como a parte superficial da membrana, ou seja, da camada filtrante e, sendo expressa em poros/m^2 , ou ainda, pode ser referida a membrana como toda e ser expressa de forma adimensional através das densidades da membrana e do polímero composto.

Quanto maior a porosidade da subcamada, menor a resistência ao fluxo do solvente através da membrana. A porosidade de uma membrana relaciona-se diretamente com o processo utilizado em sua preparação ou em seu pós-tratamento (PELEGRIN, 2004; MAESTRI, 2007; GIACOBBO, 2010).

3.5.3.3. Seletividade

A seletividade depende da distribuição dos diâmetros dos poros. A sua determinação para uma membrana é de fundamental importância para sua caracterização da mesma. No entanto, não se encontram membranas com os mesmos diâmetros de poros, e sim, com uma certa distribuição em torno de um diâmetro médio.

Dentre os métodos para determinação do diâmetro médio dos poros de uma membrana, são comumente citados (PELEGRIN, 2004):

- a. Medida direta com auxílio do microscópio eletrônico de varredura;
- b. Porosimetria de mercúrio;
- c. Porosimetria de deslocamento de líquido;
- d. Uso de soluções de polímeros polidispersos;
- e. Adsorção de gases;
- f. Rejeição de partículas ou macromoléculas.

3.5.3.4. Permeabilidade

Considerando a membrana como inerte ao solvente e incompressível pela ação da pressão, o fluxo permeado de um solvente puro é diretamente proporcional à pressão transmembrana, para os processos que utilizam gradiente de pressão como força motriz

(VIANA, 2004). Contudo, quando o solvente utilizado é água pura, este parâmetro é denominado permeabilidade hidráulica (GIACOBBO, 2010). A permeabilidade hidráulica da membrana pode ser compreendida como uma medida que é proporcional à facilidade oferecida à passagem do solvente, assim, permite quantificar o material que transpassa a membrana (BARROS FILHO, 2015).

O fluxo permeado normalmente vem expresso em $L.h^{-1}.m^{-2}$, de forma a comparar a permeabilidade de membranas com diferentes áreas. O inverso da permeabilidade é a medida de resistência (R) que o meio oferece ao transporte. A permeabilidade depende das características tanto da membrana (porosidade, raio do poro, tortuosidade e espessura), como do fluido que permeia a membrana (viscosidade) (BARROS FILHO, 2015).

3.5.4. Tipos de Membranas e Módulos

Com a possibilidade de utilização das membranas nos processos de separação nas indústrias ou em estações de tratamento de água e efluentes, estas devem estar montadas sob a forma de módulos compactos. Estes módulos são elementos básicos de um sistema de membranas, por conter todas as estruturas necessárias para tornar viável o funcionamento das membranas como unidade de separação, sendo constituídos por: (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001; PELEGRIN, 2004; MAESTRI, 2007):

- Membranas;
- Estruturas de suporte da pressão, do vácuo ou da corrente elétrica, aplicados ao sistema;
- Canais de alimentação e remoção do permeado e do concentrado.

Os módulos de membranas são projetados para atender aos seguintes requisitos:

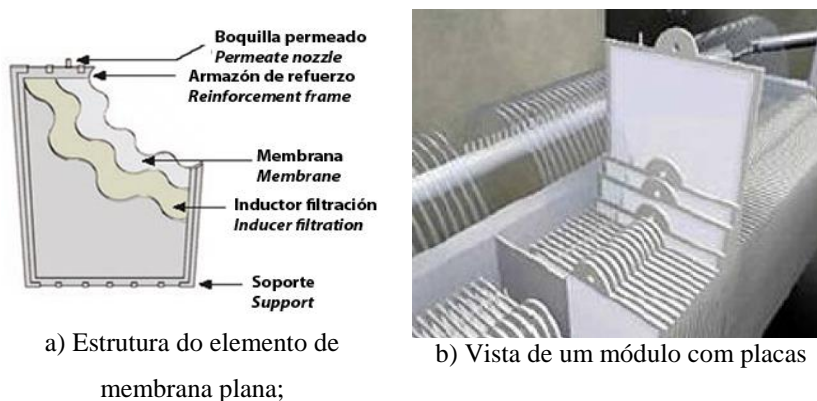
- Limitar o acúmulo de material retido pela membrana através da otimização da circulação do fluido a ser tratado;
- Maximizar a superfície da membrana por volume de módulo;
- Evitar a contaminação do permeado com o material do concentrado;
- Simplificar o manuseio;
- Permitir a limpeza eficiente da membrana;
- Reduzir o volume morto.

Com o avanço nos estudos nessa área tecnológica e a constante busca em melhorias para o alcance das condições citadas, surgiram diferentes tipos de módulos de membrana:

módulos com placas, módulos espirais, módulos tubulares, módulos com fibras ocas e módulos com discos rotatórios (MAESTRI, 2007; GIOCOBBO, 2010):

- Módulo com placas: é considerado um dos módulos mais simples, o projeto consiste em camadas alternadas de membranas planas e placas de suportes, empilhados verticalmente ou horizontalmente (Figura 10), além de possuir uma densidade volumétrica relativamente pequena quando comparada com as de fibra oca ou espiral, variando entre 100 e 400 m²/m³ (RADJENOVIC, 2008). Os principais usos são na eletrodialise e sistemas de tratamento de água e efluente.

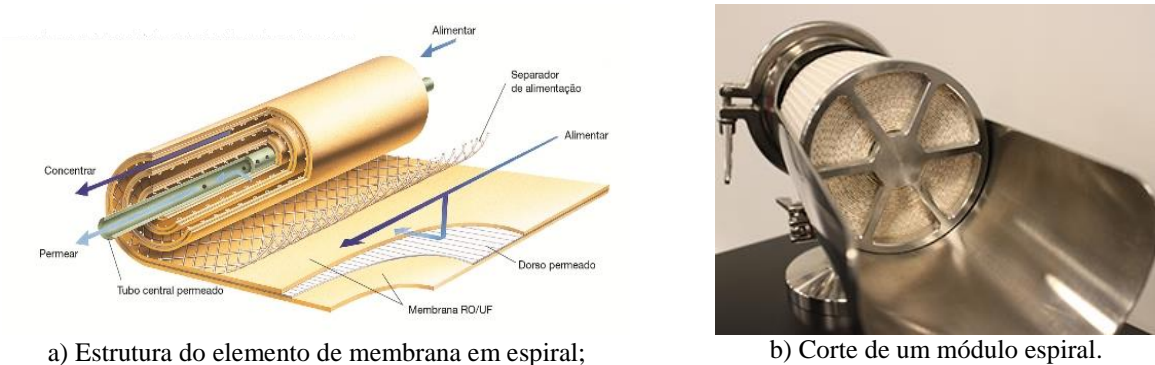
Figura 10– Módulo de membranas com placas.



Fonte: Torres, 2006.

- Módulos espirais: é confeccionada em um conjunto de tubos de pressão de PVC ou aço inoxidável e no seu interior é formado por elementos ou cartuchos de membranas espirais. Cada elemento é construído por membranas e espaçadores enrolados em volta de um tubo coletor de permeado central. Para formar o elemento, uma grande quantidade de pacotes de filtração são acondicionadas nas laterais (preservando a estrutura lamelar do elemento) e enrolados em volta do tubo central coletor (Figura 11). Estes módulos apresentam altas densidades volumétricas de membranas, de 700 a 1000 m²/m³, por este motivo são os módulos mais utilizados quando há demanda de pressões intermediárias e altas, como nos sistemas de nanofiltração e osmose inversa.

Figura 11–Módulos espirais



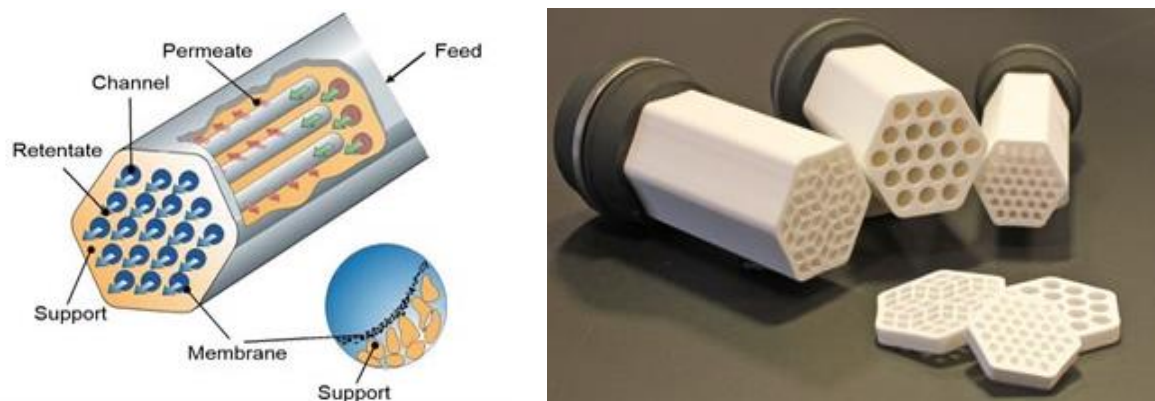
a) Estrutura do elemento de membrana em espiral;

b) Corte de um módulo espiral.

Fonte: Nitto Innovation for Customers

- Módulos Tubulares: também é considerado um módulo de formato simples, por serem tubos revestidos internamente com uma membrana. Este sistema é composto por tubos individuais ou blocos de tubos empacotados no interior de cilindros de suporte (Figura 12). Os módulos tubulares apresentam baixa densidade volumétrica de membranas, sempre menor que $300\text{m}^2/\text{m}^3$, podem ser operados a altas velocidades de transportes de líquidos dentro dos tubos. Resultando no aumento dos custos operacionais devido ao consumo de energia, o que provoca uma menor utilização.

Figura 12 – Módulos tubulares



a) Estrutura do módulo tubular

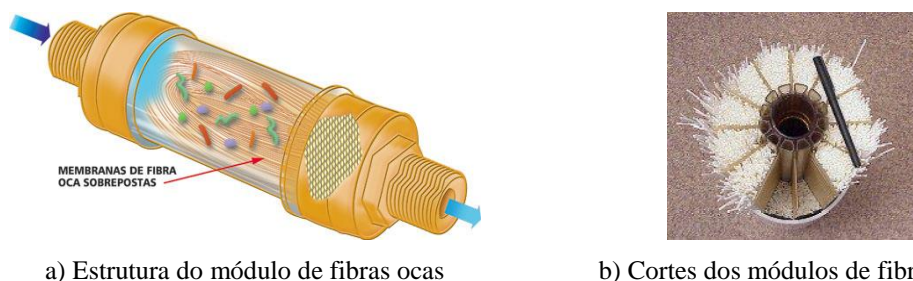
b) Cortes dos módulos tubulares.

Fonte: Tetrapak

- Módulos com fibras ocas: neste módulo as fibras são fixadas nas duas extremidades, de um tubo, com uma resina que também é utilizada como vedação e separação dos compartimentos de água bruta e permeado (Figura 13). Os módulos de fibras ocas apresentam uma maior aplicação em sistemas de microfiltração e ultrafiltração, com

a densidade volumétrica de $1000\text{m}^2/\text{m}^3$, chegando a $10000\text{m}^2/\text{m}^3$ nos sistemas de osmose reversa.

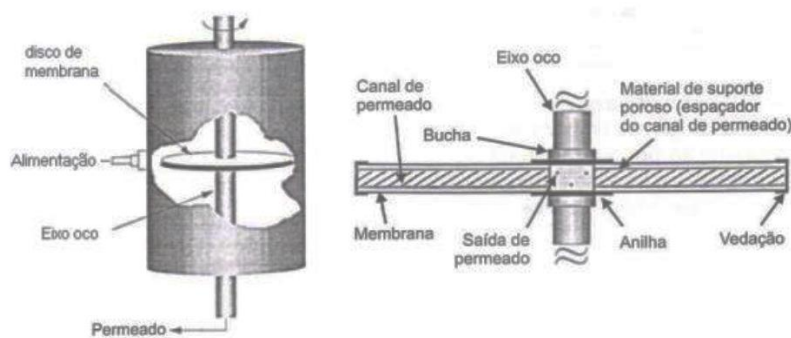
Figura 13 – Módulos com fibras ocas



Fonte: Europa shopping house.

- Módulos com discos giratórios: As membranas são fixadas em placas redondas montadas sobre um eixo giratório, que favorece a remoção contínua da camada de material que fica retida na superfície da membrana por meio de um simples giro (Figura 14). Há um alto consumo de energia, assim como não há possibilidade de aumento de escala, limitando a sua aplicação em unidades de pequeno porte. Estes são utilizados principalmente para a microfiltração e ultrafiltração de águas ou em biorreatores de membranas experimentais.

Figura 14 – Módulo com discos giratórios.



Fonte: Schneider& Tsutitya, 2001.

3.5.5. Vantagens e Desvantagens dos Processos de Separação por Membranas

Os PSM alcançaram níveis comerciais, devido às vantagens relacionadas ao uso dessa tecnologia. Algumas vantagens são (HABERT et al., 2006):

- Economia de Energia – Como os PSM promovem a separação sem que ocorra mudança de fase, na maioria das situações, tornam-se por este fato processos energeticamente favoráveis. Esta é uma das razões pela qual seu desenvolvimento coincide com a crise energética dos anos 70, devido ao grande aumento do preço do petróleo.
- Seletividade – Em algumas aplicações estes processos se apresentam como a única alternativa técnica de separação. Uma vez que é comum o uso em processos combinados, envolvendo processos clássicos e processos com membranas, cada processo atua onde é mais eficiente, mostrando-se como a opção mais econômica e vantajosa de separação.
- Separação de Compostos Termolábeis– Os PSM são operados à temperatura ambiente, podendo ser aplicados no fracionamento de misturas envolvendo substâncias termossensíveis. Por este motivo eles têm sido amplamente empregados na indústria farmacêutica e de alimentos e, mais recentemente, como uma alternativa na purificação de produtos ou recuperação de células em biotecnologia.
- Simplicidade de Operação e Escalonamento – Os sistemas são modulares e os dados para o dimensionamento de uma planta podem ser obtidos a partir de equipamentos pilotos operando com módulos de membrana de mesma dimensão daqueles utilizados industrialmente. Além disso, a operação dos equipamentos com membranas é simples e requer pouca mão de obra.

Barbosa (2009), afirma que além das vantagens citadas por Habert et al. (2006) o aumento de fiscalizações e de regulamentações ambientais durante as últimas décadas contribuíram para a aplicação dessa tecnologia de separação por membranas. A utilização das membranas torna-se favorável por possibilitar uma redução de desperdícios e aumento nas oportunidades de recuperação, além da reciclagem de substâncias, sendo um fator adicional quanto ao aspecto econômico.

Contudo os PSM apresentam alguns fatores em desvantagens quanto ao uso dessa tecnologia inovadora, tais quais (VIANA, 2004):

- É uma tecnologia que apresenta um custo elevado. Quanto aos custos de aplicação, estes vêm sendo reduzidos, tendo em vista que a produção das membranas está sendo em uma maior escala, mais empresas entrando no mercado e, quando bem operadas, apresentam um maior tempo de vida útil e um fluxo permeado mais estável e elevado;

- Por ser uma tecnologia que ainda vem sendo testada em escala comercial, é necessária uma operação por períodos mais longos buscando avaliar o melhor desempenho e determinar os valores dos parâmetros chaves, com a finalidade de garantir o melhor comportamento da membrana ao longo do tempo, e assim obter dados suficientes para a elaboração de modelos recomendáveis. Além do tempo de vida útil das membranas, que requer uma troca periódica dos módulos, mas que com o avançar das pesquisas vem aumentando esse prazo. Assim ela apresenta uma resistência natural pela inovação tecnológica;

3.6. Biorreatores de Membranas

Os biorreatores com membranas (BRM ou MBR, do inglês, Membrane Bioreactor) são reatores biológicos, combinados a membranas permo-seletivas (BEAL, 2004; VIDAL, 2006; GIACOBBO, 2010; JUDD, 2011). O biorreator tem a função de transformar matéria orgânica e mineral em matéria biológica (biomassa), enquanto que a membrana deve separar as fases líquida e sólida (MAESTRI, 2007).

Viana (2004) afirma que essa tecnologia é geralmente empregada em módulo de membranas acoplado a um reator biológico aeróbio, substituindo o decantador secundário e atingindo concentrações mais elevadas de biomassa no tanque de aeração quando comparado com o sistema de lodos ativados. Outra forma de emprego dessa tecnologia é o uso em módulo de membranas acopladas a biorreatores anaeróbios (KWANGO-HO & CHUNG-HAK, 1996; ELMALEH & ABDELMOUMNI, 1998; SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001; BEM AIM & SEMMES, 2002).

Durante o tratamento, a biomassa fica totalmente retida pela membrana, e a qualidade do efluente tratado pelo BRM (permeado) não depende das características de sedimentabilidade do lodo. Quando comparado com o sistema convencional de lodos ativados, os BRM conseguem operar com maiores concentrações de sólidos suspensos e maiores idades do lodo (METCALF & EDDY, 2003; PROVENZI, 2005; ANDRADE, 2011).

Devido à retenção provocada pela membrana, composta de alta massa molar e/ou compostos recalcitrante, estes podem permanecer no BRM por um período maior do que o tempo de detenção hidráulica médio, viabilizando o crescimento de microrganismos mais adaptados a esses compostos e que possuem maior capacidades de degradá-los. Possuindo assim, uma maior eficiência de remoção de micropoluentes, poluentes orgânicos persistentes e

poluentes lentamente biodegradáveis (BERNHARD et al., 2006), sendo uma tecnologia promissora para o reúso de efluentes (ACERO et al., 2010).

Os BRM apresentam uma menor produção de lodo, que leva a reduzir os custos de instalação, o tratamento e a disposição final do lodo, além da redução do volume do reator. Possuem uma baixa sensibilidade à variação de carga provocada pela facilidade de escoamento devido aos sistemas serem modulares (ANDRADE, 2011).

Maestri (2007) estabelece o consumo de energia proveniente da aeração como sendo 8,97-30,88% do consumo total, considerando baixo quando comparados com os processos convencionais de tratamento, no qual o consumo de energia advindo da aeração é de cerca de 80% do consumo total.

Um fator limitante para a aplicação desses BRM é o alto custo de instalação da membrana, proveniente da aquisição da mesma e da sua vida útil, que é reduzida. A colmatagem das membranas aumenta a resistência à infiltração, sobrecarregando o consumo de energia para promover a permeação, além da limpeza das membranas serem realizadas com frequência, levando ao aumento dos custos operacionais (METCALF & EDDY, 2003; ANDRADE, 2011).

3.6.1. Tipos de Biorreatores de Membranas

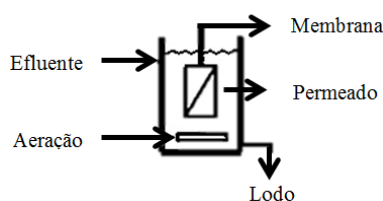
A classificação dos sistemas de BRM é realizada conforme a configuração e modo de operação, sendo distribuídos em basicamente dois grupos: o módulo de membranas submerso no biorreator, e o módulo de membranas externo ao biorreator (LENS et al., 2002; METCALF & EDDY, 2003; MAESTRI, 2007; RADJENOVIĆ et al., 2008; GIACOBBO, 2010).

3.6.1.1. BRM com módulos de membrana submersa

Esta classificação é caracterizada através da imersão do módulo de membranas diretamente dentro do reator biológico ou em tanque separado para as membranas. O processo de tratamento funciona com a permeação da solução, onde as membranas são postas a um vácuo, no sentido de permeado, assim, os sólidos maiores que os poros da membrana ficam retidos no biorreator, enquanto que as inferiores aos tamanhos dos poros passam pela membrana e são coletados como permeado (METCALF & EDDY, 2003). Ver Figura 15.

Segundo Giacobbo (2010) uma sucção é provocada na membrana lado do permeado é provocado geralmente por uma bomba peristáltica ou a vácuo. No entanto, é a diferença de pressão que provoca a passagem de líquido através da membrana, ou outra forma de obter este mesmo efeito é através da própria pressão hidráulica, que é gerada pela diferença da altura da coluna de líquido com relação ao módulo de membranas. É possível que o módulo de membrana fique posicionado diretamente sobre o sistema de aeração, ou em um compartimento separado dentro do próprio biorreator (WU et al., 2008).

Figura 15 - Configuração do biorreator com módulo de membrana submerso



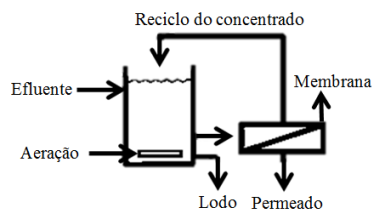
Fonte: Judd, 2006.

3.6.1.2. BRM com módulos de membrana externa

A configuração do BRM com módulos de membrana externa consiste em um biorreator no qual seus módulos são acoplados externamente. Dessa forma, a suspensão do biorreator é bombeada ao sistema de membranas, promovendo a separação por dois canais: o do permeado (efluente tratado e removido do sistema); e do concentrado (rejeito do tratamento e retorna ao sistema do biorreator) (LENS et al., 2002; METCALF & EDDY, 2003). Ver Figura 16.

Com os BRMs que apresentam o módulo de membrana como sendo externas apresentam uma maior flexibilidade operacional e permitem a aplicação de maiores fluxos em relação ao módulo submerso (MAESTRI, 2007). Segundo Viana (2004) os módulos externos exigem um consumo de energia de cerca de duas ordens de grandeza a mais que os módulos submersos devido à necessidade de elevadas velocidades tangenciais de lodo no módulo. Restringindo a utilização deste modelo de biorreator a sistemas de pequeno e médio porte, em que o reúso de água seja economicamente importante ou a otimização de espaço faça-se um importante critério operacional (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001).

Figura 16 - Configuração do biorreator com módulo de membrana externa



Fonte: Judd, 2006.

3.6.1.3. Vantagens e desvantagens dos tipos de módulos

Como todo sistema, o uso das membranas em diferentes configurações de módulos apresentam vantagens e desvantagens. Dentre as especificações de uso submersos ou externos pontuam-se as seguintes questões (Tabela 7).

Tabela 7 – Vantagens e desvantagens dos módulos de membranas submersos e externos

CONFIGURAÇÃO	VANTAGENS	DESvantagens
Módulo Submerso	<ul style="list-style-type: none"> -Redução do <i>fouling</i> irreversível pela operação em menores pressões; -Menor frequência para limpeza química; -Possibilidade de retrolavagem; - Possibilidade de retrolavagem. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de aeração vigorosa; -Baixa resistência a hidrocarbonetos/óleo livre.
Módulo Externo	<ul style="list-style-type: none"> - Membranas resistentes; - Facilidade na interrupção da linha; - Facilidade de manutenção. 	<ul style="list-style-type: none"> - Maior consumo de energia pelo sistema de recirculação; - Aumento do <i>fouling</i> pela operação em maiores pressões; - Maior frequência de limpeza; - Maior custo operacional.

Fonte: TORRES, 2006.

3.6.2. Importantes Aspectos dos BRMs

Vários são os fatores que interferem nos usos de tecnologias, desde o tratamento de efluentes mais simples, como as lagoas, até as mais sofisticadas e avançadas como os BRM. Dentre os fatores externos que podem interferir no desempenho estão os aspectos locais como o clima, temperatura e a característica do efluente, e suas variações. Outros fatores interferem diretamente na operação e os parâmetros envolvidos podem ser controlados, como é o caso de concentração de oxigênio, pH, concentração de biomassa, dentre outros (MAESTRI, 2007; GIOCOBBO, 2010).

Para o BRM, por se tratar de um PSM, além de sofrer interferência dos fatores anteriormente citados, há outros que podem vir a influenciar a performance das membranas. Alguns desses fatores são: aeração, concentração de sólidos, pressão transmembrana, colmatagem em BRM, polarização por concentração, compactação da membrana, fluxo crítico e limite.

3.6.2.1. Aeração

O sistema de aeração é utilizado nos métodos aeróbios e o objetivo deste é fornecer oxigênio para os microrganismos presentes no biorreator, com o intuito de proporcionar as reações biológicas na biomassa, para assim biodegradar a matéria orgânica presente. Este sistema também pode ser utilizado para manter a biomassa em suspensão (MELCHIOR et al., 2003).

Além dos objetos citados, há outra grande finalidade para o uso de aeradores. As bolhas de ar provocadas pelos aeradores favorecem as reações biológicas dentro do BRM, ao entrar em contato a superfície da membrana reduz a disposição e remove algumas partículas depositadas sobre a mesma, pela velocidade tangencial nas proximidades dos módulos de membranas (JEONG et al., 2007; ARABI & NAKAHLA, 2008; APTEL et al., 2002 apud PROVENZI, 2005; MAESTRI, 2007; GIACOBBO, 2010).

3.6.2.2. Concentração de Sólidos

Giocobbo (2010) afirma que a presença de sólidos dissolvidos, coloidais ou em suspensão no biorreator, interfere diretamente no seu desempenho. A presença de sólidos é

inversamente proporcional ao fluxo de permeação, ou seja, quanto maior a concentração de sólidos no biorreator, mais lento fica o processo de permeação por sobrecarregar o sistema devido à deposição dessas partículas sobre a superfície da membrana.

Segundo Viana (2004), não é aconselhável a submissão de elevadas concentrações de sólidos suspensos totais no tanque de aeração (SSTA), visto que podem dificultar a turbulência que é responsável pela minimização da sedimentação de partículas sobre o módulo de membrana submersa. Visvanathan et al., (2000) ainda afirma outro motivo para evitar altas concentrações (superiores a 40.000-50.000 mg/L) devido ao risco de queda brusca de fluxo de permeação devido ao aumento da viscosidade da biomassa.

3.6.2.3. Pressão Transmembrana

De acordo com Provenzi (2005) a pressão transmembrana (PTM) é diretamente relacionada ao acúmulo de partículas sobre a membrana. Assim, quanto menor a pressão, maior é a estabilidade do sistema em manter a filtração, observando menores variações do fluxo permeado ao longo do tempo.

Portanto, a PTM é dada pela diferença de pressão entre o lado da alimentação da membrana e o lado do permeado (GEAFILTRATION, 2006).

3.6.2.4. Processos de Colmatação nos BRMs

A colmatação é um processo físico desenvolvido por meio da formação de camadas de partículas que são decaídas por sobre a membrana filtrante acarretando em uma diminuição no fluxo de permeação, processo que passa-se no decorrer do período de operação (GIOCOBBO (2010)).

A diminuição da eficiência está diretamente relacionada com a perda na capacidade de garantir um alto fluxo com a menor pressão possível, por longas durações de tempo. Alguns fatores responsáveis por esse efeito de diminuição da eficiência são: compactação, acúmulo reversível de material retido na superfície da membrana e o acúmulo irreversível (*fouling*) (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001; MAESTRI, 2007).

O *fouling* é uma das principais limitações nos processos de MBR, e sofre influência da interação entre membranas e os SSTA. Segundo Schneider & Tsutitya (2001) e Maestri

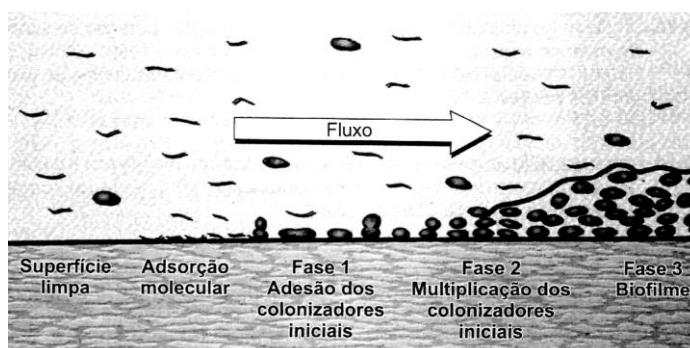
(2007), o *fouling* de membranas, em BRM é um fenômeno que é influenciado por outros fenômenos que interferem no seu desenvolvimento, como:

- Adsorção de macromoléculas e material coloidal;
- Crescimento de biofilme na superfície da membrana;
- Precipitação de matéria inorgânica;
- Envelhecimento da membrana.

Segundo Schneider & Tsutiya (2001), o aparecimento da torta dá-se com a retenção de partículas maiores que o diâmetro dos poros da membrana, formando uma camada que passa a se comportar como uma membrana adicional. A torta comumente apresenta uma estrutura irregular e dinâmica, além de um crescimento próprio. O seu crescimento é provocado pela incorporação de material particulado com diâmetro superior que seus poros, ou pelo agrupamento de colóides, partículas e moléculas de tamanho inferior que os poros da torta.

Segundo Giacobbo (2010), quando BRM são utilizados em processos biológicos para o tratamento de esgotos sanitários o processo de colmatação da membrana ocorre por *biofouling*, este se deve principalmente ao depósito de matéria orgânica, especialmente ao crescimento de comunidades microbianas. O *biofouling* difere do acúmulo passivo de material na superfície da membrana pela natureza dinâmica do biofilme microbiano, no qual ocorre a multiplicação dos microrganismos envoltos por um gel, que é composto por polímeros extra celulares produzidos pelos próprios organismos do biofilme. A Figura 17 apresenta o processo de formação do biofouling, também conhecido como biofilme, na superfície das membranas.

Figura 17 – Esquema da sequencia de eventos para formação do biofilme.



Fonte: Schneider & Tsutiya (2001)

Diversas são as consequências negativas que o *biofouling* associa ao processo de filtração em MBR:

- Aumento da intensidade da concentração-polarização pelo acúmulo de sais rejeitados pela membrana na matriz dos biofilmes;
- Sítios de cristalização no interior de biofilmes podem induzir a precipitação de sais minerais de baixa solubilidade;
- Biofilme pode bloquear os canais de alimentação e do concentrado;
- Bactérias do biofilme podem degradar alguns materiais da membrana;
- Biofilme no canal do permeado pode contaminar o permeado;
- Redução do fluxo de operação;
- Interrupção da operação para limpeza química da membrana;
- Aumento dos custos operacionais pelo aumento do consumo de energia e com a compra de produtos químicos;
- Redução da vida útil da membrana.

3.6.3. Parâmetros Operacionais dos BRMs

Segundo Petrus (1997), as condições de operação de uma membrana são muito importantes, tanto pelo aspecto de minimização do fenômeno da colmatção, quanto pelo aspecto econômico. Pois, consumo de energia aumenta com o aumento da pressão, velocidade de circulação e temperatura, interferindo nas ações relacionadas à colmatção.

3.6.3.1. Potencial Hidrogeniônico (pH)

A concentração de íons hidrogênio é um importante parâmetro de qualidade de águas sejam elas naturais ou esgoto. A forma de expressar essa concentração de íons hidrogênio é na forma de pH. A faixa de pH ideal para a sobrevivência de maior diversidade biológica é entre 6 e 9, faixas mais elevadas que essa concentração íons hidrogênio nos efluentes dificultam a eficiência da realização do tratamento biológico (METCALF & EDDY, 2003).

3.6.3.2. Temperatura

O fator temperatura é de fundamental importância no tratamento biológico de efluentes, por influenciar na manutenção das atividades metabólicas dos microrganismos contidos no BRM, mas também pela forte influência nas taxas de transferência de gás e sedimentação dos sólidos biológicos (METCALF & EDDY, 2003).

3.6.3.3. Idade do lodo

A idade do lodo está relacionada ao tempo médio de detenção celular, ou seja, o período em que determinada partícula em suspensão permanece no tanque de aeração (VIANA, 2004). Esta é determinada pela razão entre a massa de sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração (SSVTA) e pela massa de sólidos suspensos voláteis (SSV) descartada diariamente.

3.6.3.4. Tempo de detenção hidráulica

O tempo de detenção hidráulica é o tempo em que um volume de líquido permanece no biorreator. Sendo obtido através da divisão da vazão do que entra no BRM pelo volume do reator (SOUSA, 2008). GRELIER et al. (2006) em seu estudo com BRM com membrana submersa operado com TRC de 8 dias o desempenho foi baixo e mais suscetível ao fenômeno do *fouling*.

3.6.4. Mecanismos que auxiliam no controle da colmatação

3.6.4.1. Disposição da membrana e difusores de ar

A forma de dispor o módulo da membrana submersa (verticalmente ou transversalmente) pode dificultar a sedimentação de partículas por sobre ela, sendo este um mecanismo que deve ser levado em consideração durante o processo de construção do sistema. A inclusão de difusores de ar abaixo do módulo de membrana promove turbulência nas proximidades do módulo, dificultando a deposição de sólidos.

3.6.4.2. Procedimento de retrolavagem

A retrolavagem em membranas de micro e ultrafiltração é realizada periodicamente e é iniciada quando o fluxo de filtração atinge um valor limite pré-estabelecido. Quando realizado de forma eficiente restaura o fluxo da membrana a um valor próximo ao inicial (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001).

Pode ser realizado das seguintes formas:

- Tangencial: bombeando o permeado pelo canal de concentrado, fazendo a direção contrária à filtração;
- Frontal: bombeando o permeado através da membrana em sentido inverso a filtração;
- Com ar comprimido: bombeando o ar comprimido com alta pressão pelo canal do permeado;

3.6.5. Limpeza da membrana

É comum o processo de colmatção nas membranas durante o funcionamento do biorreator, logo faz-se necessária a limpeza destas como uma medida prologar o tempo de vida útil das membranas.

A limpeza é indicada quando alguns parâmetros de operação atingem valores pré-estabelecidos, como: cinética da redução de fluxo de permeação, redução de rejeição de solutos pela membrana e aumento da pressão diferencial entre as extremidades do módulo.

A limpeza física é caracterizada pela retrolavagem, podendo fazer parte do ciclo operacional do BRM, ou quando é perceptível a elevação dos valores de pressão transmembrana ou quedas no fluxo (BELLI, 2015).

A limpeza química é realizada quando não foi possível a retirada do material pela retrolavagem (sedimentos, sais, sílica, biofilmes microbianos, óxido de ferro, dentre outro). Nela consiste em uma reação físico-química entre o reagente utilizado na limpeza como agentes oxidantes (hipoclorito de sódio), solução alcalina (hidróxido de sódio) e solução ácida (ácido cítrico), desempenhando diferentes funções na remoção do *fouling*.

3.7. Reúso

Mancuso e Filho (2003) afirmam que o reúso de água subentende uma tecnologia desenvolvida em maior ou menor grau, dependendo dos fins a que se destina a água e de

como ela tenha sido usada anteriormente. De maneira geral o reúso da água pode ocorrer de forma direta ou indireta, por meio de ações planejadas ou não.

Mancuso e Santos (2003) classifica o reúso de água em duas grandes categorias: potável e não potável.

- Reúso potável: O direto, quando utiliza-se de tratamentos avançados e é reutilizados no sistema de água potável; E o indireto, quando o efluente pós tratado é disposto no corpo hídrico, e assim purificado naturalmente sendo captado subsequentemente, passando por tratamento e posteriormente ser usado como água potável.
- Reúso não potável: para fins agrícolas (irrigação de plantas alimentícias); para fins industriais (refrigeração, águas de processo, utilização em caldeiras); para fins recreacionais (irrigação de plantas ornamentais, campos de esportes, parques, lagoas ornamentais); para fins domésticos (rega de jardins residenciais, descargas sanitárias); manutenção de vazões (visa a diluição adequada de eventuais cargas poluidoras); Aquicultura (produção de peixes e plantas aquáticas visando a obtenção de alimentos e/ou energias utilizando os nutrientes presentes nos efluentes tratados); recarga de aquífero subterrâneo (direta ou indiretamente).

A Resolução nº 54 de 28 de novembro de 2005, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH apresenta as seguintes definições:

- I. água residuária: esgoto, água descartada, efluentes líquidos de edificações, indústrias, agroindústrias e agropecuária, tratados ou não;
- II. reúso de água: utilização de água residuária;
- III. água de reúso: água residuária, que se encontra dentro dos padrões exigidos para sua utilização nas modalidades pretendidas;
- IV. reúso direto de água: uso planejado de água de reúso, conduzida ao local de utilização, sem lançamento ou diluição prévia em corpos hídricos superficiais ou subterrâneos;
- V. produtor de água de reúso: pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, que produz água de reúso;
- VI. distribuidor de água de reúso: pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, que distribui água de reúso;
- VII. usuário de água de reúso: pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, que utiliza água de reúso.

A prática do reúso de água contribui de forma significativa com a redução do volume de água captada pelo sistema de abastecimento convencional e do efluente gerado pela prática

da atividade. É importante salientar que para o reúso ser adotado, as características do efluente disponível devem estar compatíveis com a qualidade exigida à sua aplicação. Atualmente, o reúso é uma alternativa que não pode ser ignorada, e estudos apontam uma distinção cada vez menor entre técnicas de tratamento de água e técnicas de tratamento de esgoto. (IWAKI, 2015)

Segundo Rodrigues (2005) o reúso pode ser classificado quanto ao método conforme é realizado e quanto ao uso final. O método pode ser considerado se há ou não descarte das águas nos corpos hídricos, antes do próximo uso.

- Reúso indireto: quando a água utilizada é descartada nos corpos hídricos superficiais ou subterrâneos, diluída e depois captada para novo uso.
- Reúso direto: segundo a Resolução nº 54/05 do CNRH, uso planejado de água de reúso, conduzida ao local de utilização, sem lançamento ou diluição prévia em corpos hídricos superficiais ou subterrâneos.

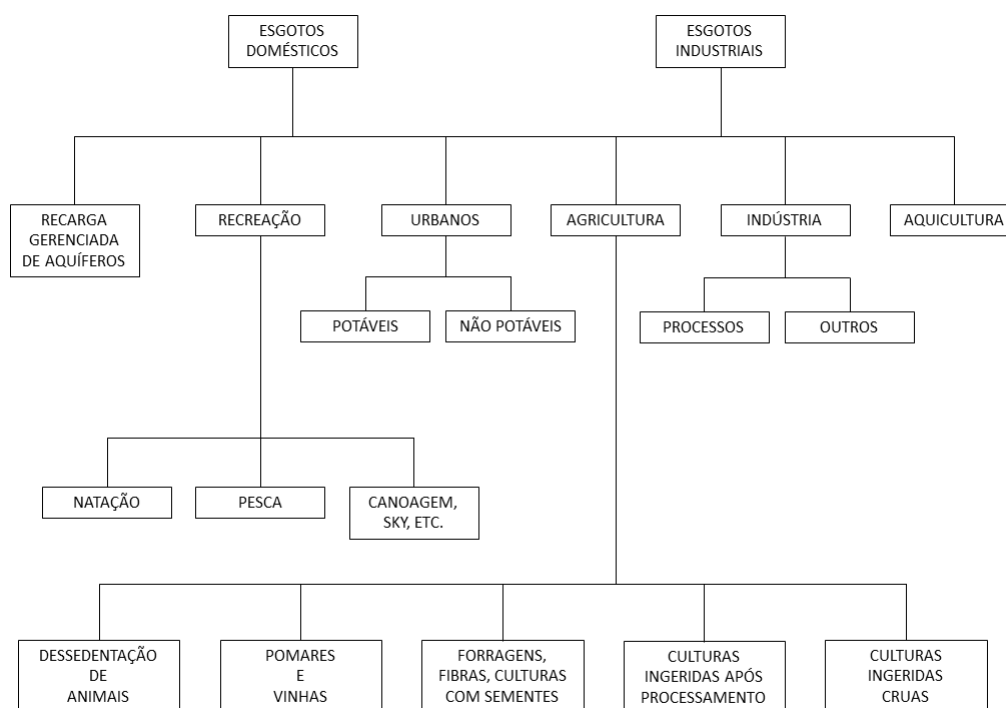
O reúso pode ser diferenciado de acordo com a intenção em realizá-lo:

- Reúso indireto planejado: ocorre quando os efluentes, depois de tratados, são descarregados de forma planejada nos corpos de águas superficiais ou subterrâneas, para serem utilizadas a jusante, de maneira controlada, no atendimento de algum uso benéfico.
- Reúso indireto não planejado: ocorre quando a água, utilizada em alguma atividade humana, é descarregada no meio ambiente e novamente utilizada a jusante, em sua forma diluída, de maneira não intencional e não controlada. Caminhando até o ponto de captação para o novo usuário, a mesma está sujeita às ações naturais do ciclo hidrológico (diluição, autodepuração).

A Figura 18, a seguir, esquematiza os tipos básicos de uso potencial dos efluentes tratados que podem ser implementados tanto em áreas urbanas, quanto em áreas rurais (HESPANHOL, 2008).

O reúso urbano deve ser utilizado quando não é exigido uma qualidade potável, a exemplo de rega de jardins, lavagens de pisos e veículos, na descarga de bacias sanitárias, dentre outros. Já o reúso urbano para fins potáveis, ocorre em locais em que a escassez hídrica é crônica e o reúso é a única solução adequada disponível. Neste caso os cuidados são redobrados, o nível de tratamento exigido é o terciário e que posteriormente este efluente siga para um tratamento complementar para potabilizar essa água, no entanto, essas exigências elevam os custos em relação com os benefícios equivalentes.

Figura 18 - Formas potenciais de reúso de água.



Fonte: Hespanhol (2008).

A aplicação da técnica do reúso para fins agrícolas bem projetadas traz grandes vantagens, tanto técnicas e econômicas como ambientais. Telles & Costa (2010) elencam que para garantir o rigor do planejamento, e evitar danos à saúde humana, ao solo, ao lençol freático, e assim garantir o sucesso do reúso na agricultura, é importante tomar alguns cuidados quanto ao uso de culturas adequadas para o local, efetuar o rodízio de culturas, controlar a presença de substâncias orgânicas, inorgânicas e nitratos, manter técnicas de irrigação projetada para cada caso, aplicar um sistema de drenagem, usar técnicas integradas para controle de vetores e respeitar as normas de controle da saúde pública.

A aplicação de reúso em processos industriais deve considerar uma grande atenção para a qualidade da água em questão e os efeitos potenciais à saúde dos usuários nas instalações da indústria, sem esquecer dos aspectos não menos importante que a indústria poderá ficar sujeita caso não seja tomada as devidas medidas de tratamento antes do reúso, como é o caso de corrosão, incrustação e deposição de materiais sólidos nas tubulações, tanques e outros equipamentos, e até mesmo efeitos danosos aos processos produtivos (alterações das características físicas e químicas dos produtos finais).

A busca constante pela água intensificou a extração da mesma, nos lençóis freáticos, crescendo junto uma preocupação com a recarga destes aquíferos, uma vez que a extração desse recurso está incompatível com a recarga natural, e que ainda sofre as consequências da contaminação das águas superficiais e do solo que comprometem o lençol freático. Com este princípio, estão em desenvolvimento projetos de recarga artificial funcional, confiável e sustentável. Para isso é necessário que a qualidade do efluente lançado esteja de acordo com os padrões adequados, assim, com o tratamento do efluente é possível controlar a contaminação da água do solo, evita o rebaixamento superficial do solo estrutural dos aquíferos, permitindo aumentar a disponibilidade da água tanto para o uso imediato, quanto para futuro, devido a esse processo de infiltração no solo poder atingir níveis de qualidade equivalentes a um ótimo tratamento a depender das condições hidrogeológicas locais.

Outros tipos de reúso incluem o aproveitamento de água de chuva, que dependerá da qualidade do ar no local da precipitação e das condições pluviométricas, podem ser armazenadas em cisternas e serem destinadas ao uso não potável, uma vez que os microrganismos presentes na água pode se desenvolver após a reservação e colocar em risco a saúde do indivíduo no uso para fins potáveis. Para isso ser evitado alguns cuidados devem ser tomados, manutenção e controle com a luminosidade, acondicionamento e limpeza são fundamentais para esse controle de qualidade.

Em algumas regiões faz-se necessária a dessalinização da água, principalmente devido a falta desse recurso, a tecnologia de dessalinização está sendo cada vez mais utilizada. Comumente é utilizada em ilhas, ou em países como do Oriente Médio, que sofrem com a escassez crônica da água. Há duas técnicas para dessalinizar a água: por destilação (através da evaporação e condensação) e por osmose reversa (a água sob pressão passa por uma membrana que retém os sais).

3.7.1. Reúso na Indústria

Os custos elevados da água para o uso industrial muitas vezes devido ao problema de escassez em que a região está envolvida são estímulos para que as indústrias busquem o reúso, viabilizando a maximização da eficiência no uso dos recursos hídricos, beneficiar a imagem da empresa no âmbito ambiental, garantir a qualidade da água tratada, viabilizar um sistema “fechado”, com descarte mínimo de efluente garantindo o abastecimento, credenciar a empresa com certificação ambiental (TELLES; COSTA, 2007).

Costa (2010) e Silva (2002) exemplificam o reúso da água em processos industriais, em sistemas de resfriamento, sistemas de produção de água quente e vapor (caldeiras), no próprio sistema industrial, podendo demandar um tratamento avançado, elevando o nível de investimento, e para outros usos menos nobres como rega de jardins, lavagem de pisos, veículos automotivos e de equipamentos.

Levando em consideração as várias aplicações da água na indústria é sabido que os efluentes apresentam qualidades diversas, assim, o tratamento da água de reúso deve ser feito visando o atendimento das especificações de cada uso em particular.

Em 2005, a revista Gerenciamento Ambiental fez um levantamento das possibilidades de reúso de efluentes no processo industrial de diferentes segmentos, permitindo uma visão comparativa da variedade de efluentes. Quanto ao acúmulo de sais dissolvidos em um sistema fechado devido ao reúso contínuo, pode se tornar inconveniente; o reúso da terceira água de lavagem para a primeira lavagem dos equipamentos do turno seguinte, assim como o reaproveitamento da água de resfriamento para a limpeza; ou até mesmo após o tratamento do efluente, acrescentar uma etapa de tratamento por membranas (osmose reversa ou ultrafiltração) podendo ser recuperado para o uso em áreas operacionais.

O reúso de água em nível industrial já é uma realidade, porém associadas a iniciativas isoladas dentro do setor privado. Principalmente, por ser economicamente viável em função dos custos e por reduzir o volume de efluentes lançados nos corpos hídricos (MACÊDO, 2001; TELLES; COSTA, 2007).

3.8. Legislação e Normatização do Reúso

A água tem sua legítima importância para o desenvolvimento de diversas atividades humanas. Porém, a ênfase legislativa incide na racionalização do uso primário da água, estabelecendo princípios e instrumentos para sua utilização. Diferentemente da prática do reúso, que não há quase preocupação legislativa quanto a fixação de princípios e critérios (SETTI, 1995).

A falta de preocupação específica na área jurídica do reúso de águas, dá a impressão de que após a utilização da água, o seu descarte na forma de efluente seja ele doméstico ou industrial é um problema secundário. No entanto, sabemos que a realidade vivenciada, exige de atenção para esse aspecto especificamente.

As classificações das águas doces, salobras e salinas de acordo com as utilizações e respectivos padrões de qualidade foram dadas pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (tabela 8) que revogou a Resolução CONAMA nº 20/1986. Esta também regulamenta os procedimentos para o lançamento de efluentes nos corpos receptores e define concentrações máximas para o lançamento de algumas substâncias.

Após um longo período a resolução CONAMA nº 20/1986 foi um dos principais instrumentos para a obtenção do controle quanto à degradação da qualidade dos recursos hídricos. Até que a Política Nacional de Recursos Hídricos instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997, impôs fundamentos, objetivos, diretrizes e instrumentos capazes de indicar claramente a posição e orientação pública no processo de gerenciamento dos recursos hídricos.

Diluída nessas resoluções e normas, o regime de outorga busca assegurar o controle qualitativo e quantitativo dos usos da água. Já com a implantação do reúso direto no processo produtivo, é permitido para o usuário a autorização por parte do poder público para o reúso da água, visto que a reutilização não se enquadra em nenhuma das hipóteses legais ofertadas.

A cobrança pelo uso das águas é materializado pelo princípio do usuário-pagador, no qual incentivará o reúso de água como forma de minimização passivo ambiental. Esse princípio favorece às tecnologias que permitem um menor descarte de efluentes, na mesma proporção em que a cobrança pelo uso da água incentivará uma captação/consumo cada vez menor, levando ao reaproveitamento dos efluentes no processo produtivo interno ou para reúso de terceiros.

Tabela 8 - Classificação das águas e seus principais usos

<i>CLASSES DE ÁGUAS DOCES</i>	<i>PRINCIPAIS USOS</i>
Classe especial	Consumo humano, com desinfecção; Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
Classe 1	Consumo humano, após tratamento simplificado; Proteção das comunidades aquáticas; Recreação de contato primário (natação, esqui aquático e mergulho); Irrigação de hortaliças consumidas cruas e sem remoção de películas; Proteção de comunidades aquáticas em terras indígenas.
Classe 2	Consumo humano, após tratamento convencional; Proteção das comunidades aquáticas; Recreação de contato primário; Irrigação de hortaliças, plantas frutíferas, parques, jardins e campos de esporte e lazer, com os quais o público possa ter contato direto; Aquicultura e atividade de pesca.
Classe 3	Consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; Dessedentação de animais.
Classe 4	Navegação; Harmonia paisagística.
<i>CLASSES DE ÁGUAS SALINAS</i>	<i>PRINCIPAIS USOS</i>
Classe especial	Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
Classe 1	Recreação de contato primário; Proteção de comunidades aquáticas; Aquicultura e atividade de pesca.
Classe 2	Pesca amadora; Recreação de contato secundário.
Classe 3	Navegação; Harmonia paisagística.
<i>CLASSES DE ÁGUAS SALOBRAS</i>	<i>PRINCIPAIS USOS</i>
Classe especial	Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
Classe 1	Recreação de contato primário; Proteção das comunidades aquáticas; Aquicultura e pesca; Consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; Irrigação de hortaliças consumidas cruas e de frutas que se desenvolvem rentes ao solo, ingeridas cruas e sem remoção de películas; de parques, jardins e campos de esporte e lazer, com os quais o público possa ter contato direto.
Classe 2	Pesca amadora; Recreação de contato secundário.
Classe 3	Navegação; Harmonia paisagística.

Fonte: resolução CONAMA nº 357/2005

Em 2005, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH, com a Resolução nº 54, estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água. Assim, situou o reúso da água como uma prática de racionalização e de conservação dos recursos hídricos, assim como o estabelecido pela Agenda 21. Promovendo a redução da descarga de poluentes nos corpos receptores, e os custos associados à poluição contribuindo grandemente para a proteção do meio ambiente e da saúde pública, conservando os recursos hídricos para o abastecimento público e outros usos mais exigentes quanto à qualidade. É aceitável as modalidades de reúso simultaneamente, podendo ser empregadas mais de uma vez em uma mesma área.

Para o reúso não potável de água, o Art. 3º abrange diversas modalidades, dentre elas: o reúso para fins urbanos: utilização de água de reúso para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, combate a incêndio; reúso para fins agrícolas e florestais: aplicação de água de reúso para produção agrícola e cultivo de florestas plantadas; reúso para fins ambientais: utilização de água de reúso para implantação de projetos de recuperação do meio ambiente; reúso para fins industriais: utilização de água de reúso em processos, atividades e operações industriais; reúso na aquicultura: utilização de água de reúso para a criação de animais ou cultivo de vegetais aquáticos.

No Art. 9º ainda desta, determina que a atividade de reúso de água deverá ser informada, quando requerida, ao órgão gestor de recursos hídricos, para fins de cadastro, devendo contemplar, no mínimo:

- I - identificação do produtor, distribuidor ou usuário;
- II - localização geográfica da origem e destinação da água de reúso;
- III - especificação da finalidade da produção e do reúso de água; e
- IV - vazão e volume diário de água de reúso produzida, distribuída ou utilizada.

Em 2010, foi criada uma nova Resolução no âmbito do CNRH, que estabelece diretrizes e critérios para a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal, a Resolução nº 121/2010. Para aplicar o reúso direto não potável para a produção agrícola e cultivo de florestas plantadas, é necessário que as características físicas, químicas e biológicas da água devam atender aos limites definidos na legislação pertinente, não apresentando riscos ou danos ambientais e a saúde pública.

Fica definido que a caracterização e o monitoramento periódico da água de reúso é responsabilidade do produtor da água de reúso, sendo a critério do órgão ou entidade

competente, onde é recomendado perante a Resolução nº 121/2010 observar: a natureza do reúso; a tipologia do processo de tratamento; o porte de instalações e vazão tratada; a variabilidade de insumos; as variações nos fluxos envolvidos; e o tipo de cultura.

O grau de tratamento necessário para o reúso (múltiplo) é descrito na NBR 13.969/97, variando quanto ao uso mais restrigente e a qualidade do efluente tratado. Porém, conforme o volume estimado para cada um dos usos pode-se prever graus progressivos de tratamento, desde que haja sistemas distintos de reservação e de distribuição.

Caso o volume destinado para o uso com menor exigência for expressivo, não haverá necessidade de submeter todo o volume de esgoto a ser reutilizado ao máximo grau de tratamento, apenas uma parte, reduzindo os custos de implantação e operação.

Nos casos de reúso menos exigentes (por exemplo, descarga de vasos sanitários) pode-se prever o uso da água de enxágue das maquinas de lavar, apenas desinfetando, reservando aquelas águas e recirculando ao vaso, em vez de enviá-las para o sistema de esgoto para posterior tratamento.

Assim sendo, para cada classificação são atribuídos valores de parâmetros para os efluentes, conforme o reúso Tabela 9:

Tabela 9 - Classes e parâmetros de reúso

CLASSES E REÚSOS	PARÂMETROS
Classe 1 – Lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador incluindo chafarizes.	turbidez - inferior a 5; coliforme fecal – inferior a 200 NMP/100ml; sólidos dissolvidos totais inferior a 200 mg/l pH entre 6.0 e 8.0; cloro residual entre 0,5 mg/l e 1,5 mg/l
Classe 2 – Lavagens de pisos, calçadas e irrigação dos jardins, manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes.	turbidez - inferior a 5; coliforme fecal – inferior a 500 NMP/100ml; cloro residual superior a 0,5 mg/l
Classe 3 – Reúso nas descargas dos vasos sanitários	turbidez - inferior a 10; coliforme fecal – inferior a 500 NMP/100ml;
Classe 4 – Reúso nos pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual	coliforme fecal – inferior a 5.000 NMP/100ml; oxigênio dissolvido acima de 2,0 mg/l

Fonte NBR 13.969/97.

Para a Classe 1, é geralmente necessário tratamentos aeróbios (filtro aeróbio submerso ou LAB) seguidos por filtração convencional (areia e carvão ativado) e, finalmente, cloração. Podendo substituir a filtração convencional por membrana filtrante.

Na classe 2 é satisfatório um tratamento biológico aeróbio (filtro aeróbio submerso ou LAB) seguido de filtração de areia e desinfecção. E assim como para a classe 1, pode também substituir a filtração por membranas filtrantes.

Normalmente, as águas de enxágue das máquinas de lavar roupas satisfazem ao padrão previsto pela Classe 3, sendo necessário apenas uma cloração. Para casos gerais, um tratamento aeróbio seguido de filtração e desinfecção satisfaz a este padrão.

Para o reúso aplicável na Classe 4, é fundamental a interrupção da aplicação por pelo menos 10 dias antes da colheita.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. A Indústria

Esta pesquisa está inclusa no projeto maior, o Bramar - Desenvolvimento de Estratégias e Tecnologias Inovadoras para Mitigação dos Efeitos da Escassez de Água no Nordeste Brasileiro. Funcionando em parceria com a Alemanha que visa o uso de águas residuárias, para fins agrícola e industrial, e a recarga controlada de aquíferos.

O trabalho proposto envolve o estudo de análises comparativas de alternativas de tratamento de efluente industrial, visando o reúso deste na própria indústria. O desenvolvimento da pesquisa ocorre em uma indústria de processamento de frutas, que localiza-se numa região que se construiu o primeiro pólo produtor de abacaxi do Brasil, no Distrito Industrial, à margem da BR 101, João Pessoa/PB. Destina a sua produção a exportação, através dos portos de Suape – Pernambuco, Natal – Rio Grande do Norte e Pecém – Ceará e ao mercado nacional através de distribuição terrestre.

Instalada em terreno medindo 74.890m², área construída de 9.450m² e possui 140 colaboradores. A unidade apresenta uma capacidade de processamento de 60.000 ton/ano de abacaxi, 20.000 ton/ano de caju, 20.000 ton/ano de manga e 15.000 ton/ano de outras frutas tropicais.

As frutas são recebidas em caminhões a granel ou em caixas, as quais são devidamente analisadas, dentro do mais rigoroso processo de determinação do grau de maturação e rendimentos para uma perfeita obtenção de sucos. Mantendo as características naturais e organolépticas de cada fruta e seus respectivos sucos.

Os sucos obtidos são criteriosamente supervisionados por técnicos, equipamentos e métodos com reconhecimento nacional e internacional. Visando garantia de qualidade com segurança alimentar, obedecendo os padrões ABNT NBR/ISO 22000:2006 (sistema de gestão da segurança de alimentos – Requisitos para qualquer organização na cadeia produtiva de alimentos), e AIJN (European Fruit Juice Association) para produção de sucos de frutas. Os produtos são certificados por sistemas de gestão da segurança de alimentos – requisitos para qualquer organização na cadeia produtiva de alimentos.

4.2. A Estação de Tratamento de Efluentes (ETE)

A indústria de processamento de frutas em estudo, conta com o sistema de tratamento de efluente industrial para lançar o mesmo em uma galeria de águas pluviais. Desde o início do ano de 2016 o efluente industrial desta, vem sendo tratado de acordo com as características técnicas requeridas pela Legislação Ambiental visando o descarte no meio ambiente.

A Estação de Tratamento de Efluente (ETE) desta indústria reforça a etapa de tratamento biológico dado aos efluentes líquidos industriais para assim completar a depuração dos agentes contaminante presentes nos efluentes, provenientes do processo industrial. No projeto desta ETE estima-se uma eficiência de remoção de DBO de 98%, estando em conformidade com a resolução CONAMA 357.

A ETE possui dimensão para uma vazão máxima de 36 m³/h. E consta de um Tratamento de Lodos Ativados, antecipada por um tratamento preliminar e tanque de homogeneização.

O efluente bruto industrial, excluindo o efluente sanitário, chega por gravidade a ETE com vazão aproximada de 25 m³/h. Primeiramente o efluente passa por um percurso a favorecer o resfriamento do efluente, passa por cloração, seguido pelo tratamento preliminar composto pelo gradeamento para a retenção dos sólidos grosseiros e flutuantes, seguido da caixa de areia para reter os materiais inertes, com dimensionamento de 3,00 m de comprimento e 0,30 m de largura contendo câmara dupla, usada alternadamente, uma câmara para limpeza, enquanto que a outra o efluente continua fluindo para a calha Parshall com garganta de 3" para a medição e o controle de vazão do efluente, encaminhando-o para a primeira elevatória da ETE. Finalizando a etapa preliminar com a peneira estática para proteger as tubulações, registros, bombas e equipamentos contra obstruções.

O efluente segue para o tanque de homogeneização e regularização de vazão (THRV) para regular a vazão e homogeneizar as características físico-químicas do efluente, neutralizando o pH. Após o THRV o efluente vai para o tanque de aeração, com dois aeradores de fluxos descendentes infiltra o oxigênio no efluente, este meio aeróbio favorece a formação de lodo e oxidação da matéria orgânica.

Após o TA, o efluente passará por três decantadores secundários (DS), onde é decantado o lodo de excesso, diariamente com o acúmulo de lodo é dada uma descarga para o leito de secagem e outra parte segue para o tanque de idade do lodo (TIL), para recircular para o TA. Para finalizar, o efluente ao sair do DS recebe uma dosagem de hipoclorito de sódio para a desinfecção antes de ir para o corpo receptor e os resíduos gerados na ETE (lodo), são armazenados no leito de secagem, e depois de secos são armazenados em container para a

disposição final no aterro sanitário licenciado pelo órgão competente.

Figura 19 - Esquema do funcionamento da ETE

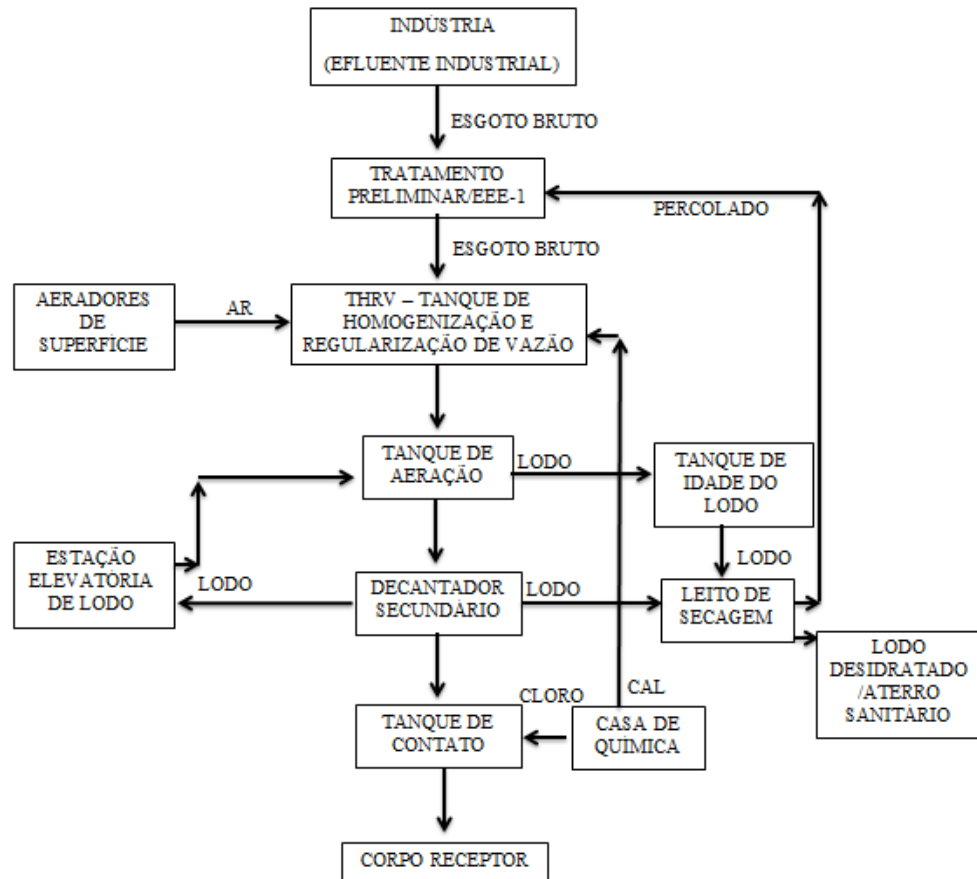
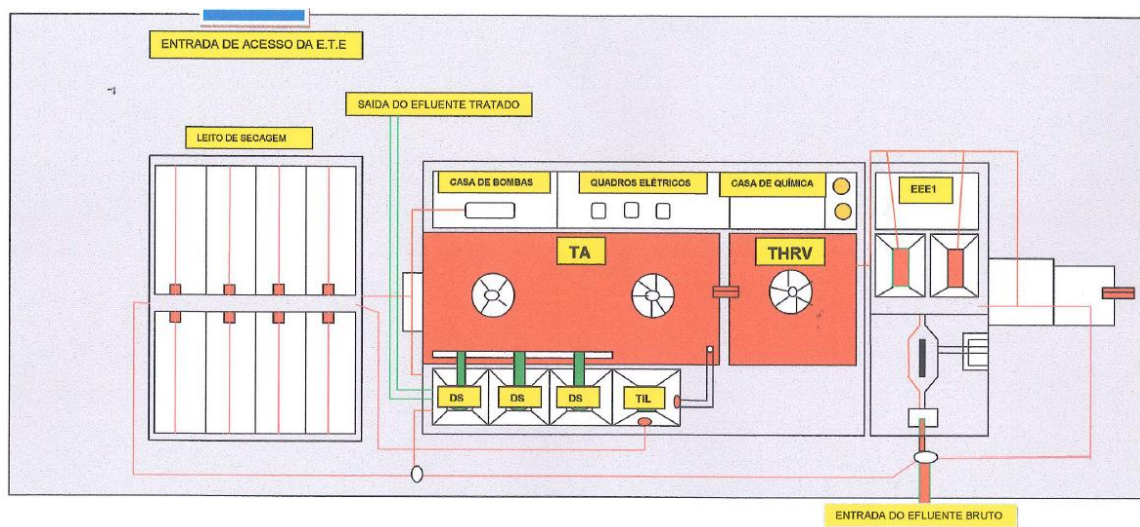


Figura 20 - Planta do funcionamento da ETE



Fonte: Indústria de processamento de frutas

4.3. Usos da Água da Indústria

A qualidade da água que vai ser utilizada depende da atividade industrial, sendo possível em uma mesma indústria precisar de vários tipos de água, nos quais os níveis de qualidade são definidos em função das características físicas, químicas e biológicas. Além do porte da indústria, relacionado à sua capacidade de produção que determina a quantidade de água adequada para cada uso (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Sob esta perspectiva algumas visitas foram realizadas na indústria de processamento de frutas como o intuito de fazer o levantamento de dados relevantes para a pesquisa, como os diversos consumos de água na indústria. Para assim conhecer quantitativamente e qualitativamente a água consumida.

4.4. Reator de Bancada

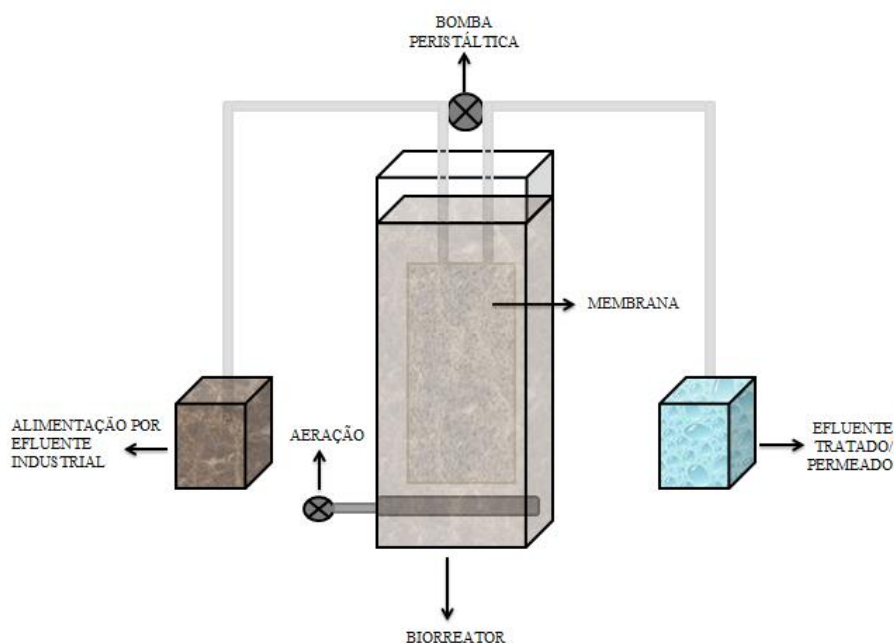
A pesquisa contou com o auxílio de um biorreator de membrana (BRM) de ultrafiltração de bancada para a realização do tratamento deste efluente industrial. Para assim verificar a eficiência deste tipo de tratamento para o efluente em estudo.

O sistema do BRM é constituído por um tanque retangular em acrílico, com capacidade de 12 L, sendo preenchida com 10 L de efluente e composto por uma membrana submersa do tipo placa plana de ultrafiltração, com área de 0,08 m² e com os poros com diâmetros variando de 0,03 a 0,2 µm, possui também uma válvula que pode ser aberta manualmente, quando for necessário analisar o conteúdo interno do BRM. Uma bomba peristáltica capaz de manter o volume constante dentro do BRM e duas bombonas, sendo uma para a alimentação do sistema com efluente e a outra para a saída do sistema com o permeado (efluente tratado). Para manter o bom funcionamento do BRM é necessário manter aeração do sistema, por meio de uma válvula que liga-se ao biorreator é injetado o ar, mantido sob uma pressão de 2 bar. O esquema está representado na Figura 21 e na Figura 22 a), b) e c) mostram o BRM utilizado.

Inicialmente foi inoculado no BRM o lodo de um sistema de tratamento aerado de um condomínio, e passou por um período de adaptação de 15 dias até ser alimentado pelo efluente industrial em estudo. A sala onde localizava o BRM, no LaCom, manteve uma temperatura variando de 18 à 25°C, aproximadamente.

O sistema começou a operar em maio de 2015, seguindo até novembro de 2016. Mas, o sistema passou por dificuldades para estabilização, visto que o efluente sofre muitas variações e por ser um tratamento biológico, torna-se muito sensível a qualquer modificação sofrida, seja a temperatura, ou as próprias condições do efluente, incluindo períodos de lavagens das máquinas.

Figura 21 - Esquema representado o MBR utilizado



Fonte: Autora

Figura 22 - Imagens do Biorreator de bancada utilizado na pesquisa.



Fonte: Autora

4.5. Coleta de Amostras e Métodos Analíticos

4.5.1. Coleta do Efluente Bruto e do Permeado

O efluente bruto é coletado na entrada da ETE da Indústria, as coletas do efluente bruto são realizadas mensalmente, através de bombonas de 5 e 10L (Figura 23) e trazidas para a UFPB, antes de passar por algum tratamento para assim, ser analisado e verificado a eficiência de remoção com o tratamento realizado em laboratório pelo BRM de bancada.

As bombonas coletadas foram mantidas sob refrigeração, pois o sistema é alimentado por apenas uma das bombonas e o mesmo é repostado quando chegado ao fim. As análises são realizadas diariamente para monitorar o BRM, da mesma forma que para caracterizar o efluente da indústria.

Figura 23 - Coleta do Efluente na Indústria de Processamento de Frutas



Fonte: Autora

4.5.2. Métodos Analíticos

As análises foram realizadas no Laboratório de Combustíveis (LaCom) localizado no Centro de Ciências Exatas e da Natureza (CCEN), local no qual se encontra instalado o BRM por este ser um laboratório que possui o equipamento indispensável para a realização desta pesquisa, devido à necessidade de um compressor para manter a aeração e o funcionamento correto do BRM de bancada, e no Laboratório de Carvão Ativado (LCA) localizado no Centro de Tecnologia (CT) que é o laboratório de suporte para algumas das análises.

Para a avaliação do desempenho do BRM, foram coletadas amostras diariamente para as análises físico-químicas do efluente bruto e do permeado. Segue abaixo a Tabela 10 identificando as análises realizadas, os métodos nos quais foram seguidos e os laboratórios aonde foram realizadas.

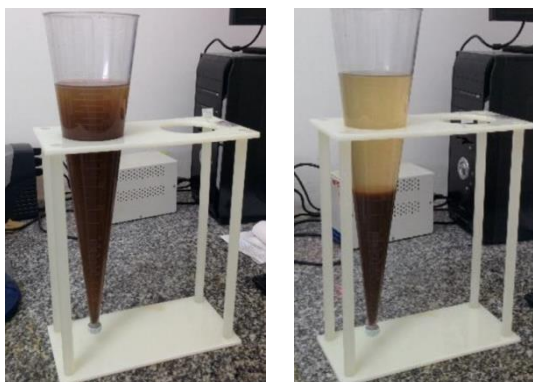
Tabela 10 - Tabela com as análises realizadas.

Análise	Método/Instrumento	Laboratório	Frequência
pH	Método potenciométrico utilizando pHmetro da Digimed	LACOM	Diariamente
Sólidos Sedimentáveis	Cone de Imhoff (NBR 10561)	LACOM	Diariamente
Sólidos Suspensos Totais	Espectrofotômetro Pastel UV Secoman	LACOM	Diariamente
DQO	Espectrofotômetro Pastel UV Secoman	LACOM	Diariamente
DBO	Espectrofotômetro Pastel UV Secoman	LACOM	Diariamente
DQO	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012)/Métodocolorimétrico de refluxo fechado – Alfakit (Digestão ácida) utilizando um espectrofotômetro HACH DR/10000	LCA	2 vezes por semana
Fósforo Total	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012)/Digestão Persulfato – Alfakit (método 10127) e leitura em espectrofotômetro HACH DR/10000	LCA	Mensalmente
N. Total-Nitrato	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012)/Digestão com Ácido Ascórbico – Alfakit (método 10031) e leitura em espectrofotômetro HACH DR/10000	LCA	Mensalmente

Ao longo das análises percebeu-se a necessidade de uma correção de nutrientes no efluente para equilibrar as frações de carbono, nitrogênio e fósforo (200:5:1) através de uma solução contendo cloreto de amônio e ácido fosfórico. Essa correção é realizada sempre com a mudança da bombona com um novo efluente, e após a análise do mesmo, para ser calculada a quantidade de cada um de acordo com a necessidade do efluente para com o sistema.

As análises de sólidos sedimentáveis foram realizadas no LaCom, onde se encontra o BRM, e por meio de uma das válvulas é possível retirar a amostra do interior do biorreator para as análises referentes ao lodo do sistema (material concentrado). É coletado 1 L desse material contido no interior do BRM em um cone de Imhoff com suporte (Figura 24 – a) de forma homogênea, após 45 minutos em repouso, é feito um giro no cone com um movimento de rotação de 360° permanecendo em repouso por mais 15 minutos, totalizando 1 hora, com lodo já decantado (Figura 24 – b), o resultado é expresso diretamente na leitura do sedimentado pela escala graduada do cone de Imhoff (mL/L) conforme indicado na NBR 10561/1988.

Figura 24 - Análises do Cone de Imhoff



a) Início da análise

b) Término da análise

Fonte: Autora

Outras análises são realizadas com o auxílio do equipamento Espectrofotômetro portátil pastel UV (Figura 25). No qual através de um pipetador automático, é coletado uma alíquota de 1000 μ L de amostra e logo após é despejado em um tubo de quartzo que é acoplado ao equipamento do pastel UV, sendo possível fazer a leitura de alguns parâmetros como Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Sólidos Suspensos Totais (SST).

Figura 25 - Pastel UV - SECOMAM



Fonte: Autora

As demais análises realizadas no LCA utilizam metodologia analítica do ALFAKIT. Para análise de DQO o método disponível é com o spectrokit, baseando-se na oxidação da matéria orgânica pelo dicromato de potássio em meio ácido. Sendo necessária a digestão da amostra, em um bloco digestor, representado pela Figura 26, a uma temperatura de 150°C por 2 horas. As análises de nitrogênio total-nitrato e fósforo total seguem a metodologia proposta

pelo ALFAKIT, no qual é necessário seguir o passo a passo indicado no kit, incluindo a permanência por 1 hora no bloco digestor a uma temperatura de 100°C para as amostras de nitrogênio total-nitrato e a permanência em banho-maria fervente para as amostras de fosfato total por 30 minutos.

Figura 26 – Bloco digestor e equipamento de leitura das amostras - HACH



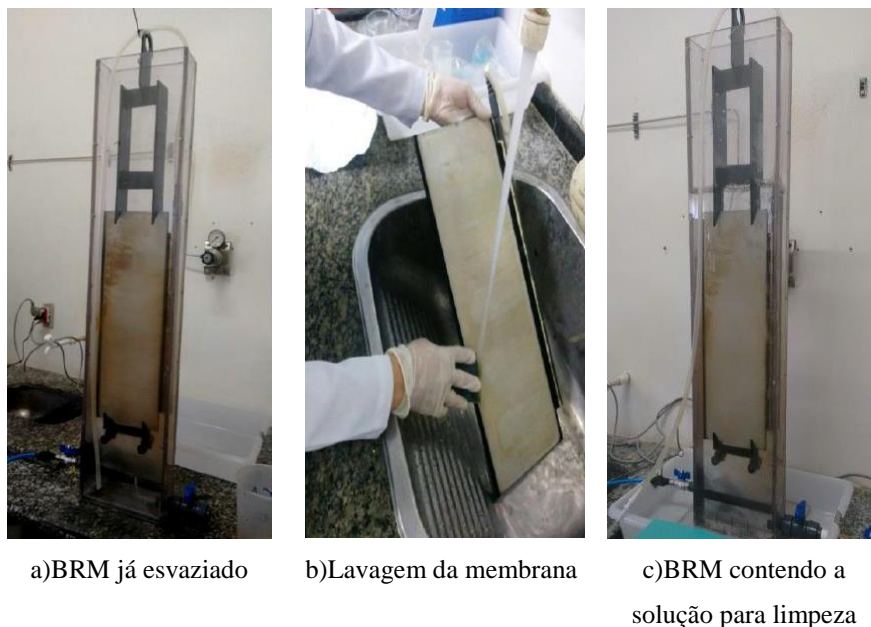
Fonte: Autora

4.6. Limpeza da Membrana

O biorreator foi lavado duas vezes, em um intervalo de 7 meses, e ambas seguiram o mesmo procedimento. Após 7 meses do início da operação do sistema de BRM foi realizada a primeira limpeza do biorreator.

O conteúdo interno do biorreator foi drenado e acondicionado em uma bombona mantida sob aeração (Figura 27-a). O biorreator foi desmembrado e a membrana foi lavada com água corrente e detergente para a remoção do biofilme que continha na superfície da membrana (Figura 27-b). Após a lavagem, e montagem do biorreator com a membrana, o tanque foi preenchido até os 10 L com água e 300 mL de ácido fosfórico (pH=2), permanecendo por 24h (Figura 27-c). E depois desse período foi descartado, e colocado novamente o conteúdo que estava na bombona sob aeração. As figuras a seguir identificam o processo de lavagem da membrana.

Figura 27 – Lavagem do BRM



Fonte: Autora

4.7. Análise dos dados

4.7.1. Análise estatística descritiva

Através do BoxPlot é possível obter um resumo descritivo das amostras analisadas, juntamente com uma representação gráfica do comportamento da distribuição dos valores. Sendo visualizado o valor dos limites máximos e mínimos, médias e medianas, além da extração dos outliers para tornar os dados mais representativos.

4.7.2. Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância – ANOVA é um teste comumente utilizado entre os pesquisadores, pois compara todas as médias em um único teste, buscando verificar a existência de diferenças significativas entre as médias dos tratamentos comparados. Segundo Mucelin (2006) a expressão “diferença significativa” deve ser entendida como uma diferença que expressa com clareza e “a principal aplicação da ANOVA é a comparação de médias oriundas de grupos diferentes, também chamados tratamentos...”. Para este trabalho foi utilizada a análise de variância com nível de 5% de significância.

Para a análise de variância formulou-se as seguintes hipóteses: H_0 (hipótese nula) para o teste F é a afirmativa de que as variâncias são iguais, ou seja, a variação entre as médias não é maior do que a variação entre as observações individuais dentro de um grupo; e H_1 (hipóteses não nulas) para o teste F ser próximo a 1, as duas estimativas da variância são diferente. Porém o teste F não mostra qual ou quais dessas médias diferem entre si.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização do Efluente e Permeado

O fator temperatura é de fundamental importância pela manutenção das atividades metabólicas do BRM. Este foi mantido no LaCom sob temperatura da sala variando entre 18°C e 25°C.

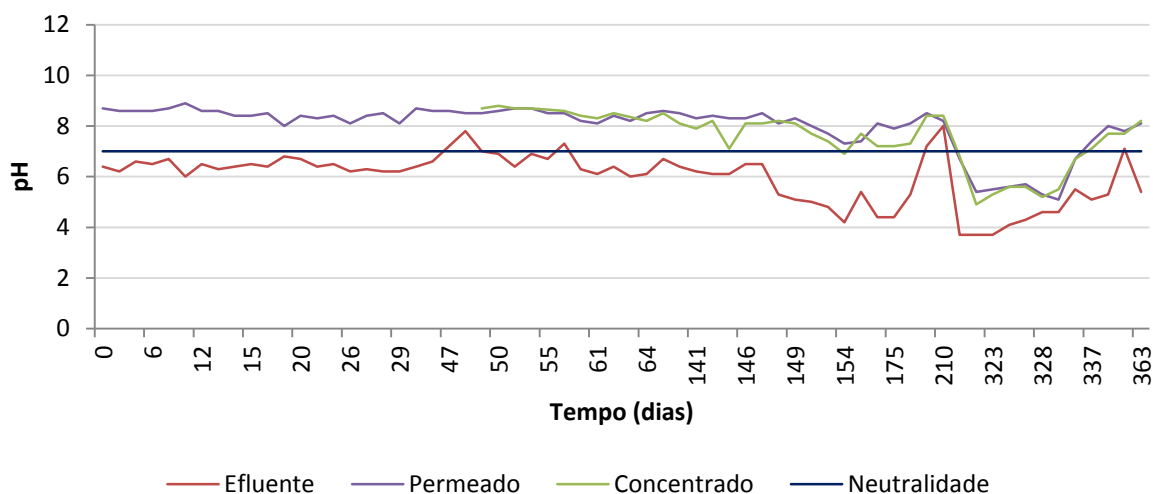
Foi verificado durante todo o período de análise que o pH, Sólidos Sedimentáveis, Sólidos Totais, DQO e DBO sofreram fortes variações ao longo do tempo. Inicialmente devido à adaptação do sistema, o lodo de uma ETE de efluentes domésticos foi inoculado no BRM antes de receber o efluente industrial, com características totalmente diferentes. Logo o conteúdo interno do BRM (material concentrado) sofreu variações, apresentando alguns picos de concentrações, porém ao longo das análises foi perceptível a permanência deste comportamento.

Esta tendência se deu pelo fato de que mesmo sendo um efluente da mesma indústria, estes possuem diferentes características por serem efluentes derivados do processamento de diferentes frutas, que ainda variam de acordo com o funcionamento da indústria, incluindo a limpeza de equipamentos que por dia pode ter até 5 ciclos de limpeza a depender da mudança de frutas a serem processadas, dentre outros fatores.

Segundo Ghiggi (2011) quando o pH torna-se ácido, tende o declínio da taxa de oxidação da amônia. Para Ferreira (2000) o controle de pH é um dos fatores mais decisivos para a eficácia do processo de nitrificação devido à possíveis flutuações do teor de nitrogênio introduzidas pelos efluentes, gerando variações de pH a ponto de causarem inibição. Ainda nesse mesmo estudo observou que com o aumento da alcalinidade e a diminuição da concentração de ácido carbônico, a tendência da desnitrificação é reverter parcialmente os efeitos da nitrificação, elevando o pH do meio.

Pode-se perceber na figura 28 que houve aumento de pH tanto no permeado quanto no concentrado (lodo) ao longo do tratamento biológico, provavelmente devido a interação de íons H^+ com a membrana. A partir do 236º dia, foi acrescentado nutrientes, com o intuito de corrigir uma deficiência observada para o recomendado no tratamento biológico de efluente. Um fator que pode ter contribuído para a baixa significativa de pH neste tratamento em especial no permeado e no concentrado, foi um teste de sal e glifosato realizado por uma outra pesquisa, paralela a esta, que utilizou-se do mesmo biorreator.

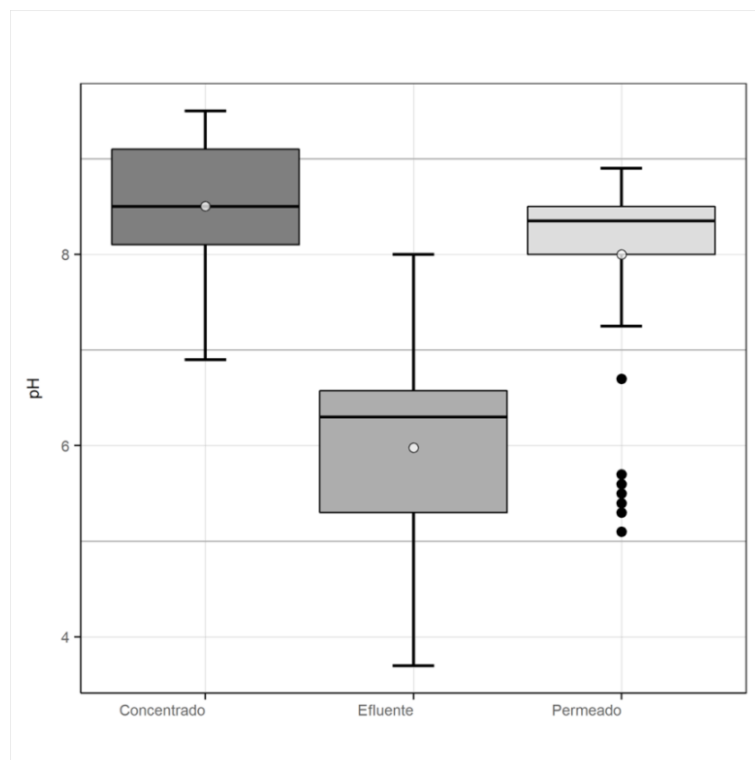
Figura 28–Comportamento do pH durante o funcionamento do BRM



Através da Figura 29 é possível obter um resumo descritivo das análises em estudo com identificação de outliers. Percebe-se que o pH do concentrado manteve-se na média de 8,5, enquanto que o efluente que alimentava o BRM apresentou uma média de 6,0, e o permeado um pH de média 8,0. A faixa de pH para manter o funcionamento ideal das atividades biológicas é entre 6 e 9 (METCALF; EDDY, 2003). Assim, correções do pH foram realizadas de acordo com a necessidade, sendo adicionadas soluções de hidróxido de sódio (NaOH) ou ácido clorídrico (HCl).

A Figura 29 indica que 50% das amostras do concentrado ficam compreendidas entre 8,1 e 9,1. Observa-se uma assimetria negativa, comprovado por meio de informações como a distância do limite inferior até o 1º quartil corresponde a amplitude de 1,2, enquanto que a do limite superior ao 3º quartil equivale a 0,4. Portanto 25% dos dados menores que o 1º quartil, apresenta uma amplitude maior que os 25% dos dados que são maiores que o 3º quartil. Além de que a mediana (8,5) encontra-se aparentemente sobreposta a média, porém, deslocada para o 1º quartil. Por mais que essas distâncias sejam diferentes, o número de amostras entre elas é igual para ambas.

Figura 29 – BoxPlot da distribuição do pH no efluente que alimenta do BRM, do concentrado contido no lodo e do permeado.



Para o efluente industrial, 50% das amostras possuem pH entre 5,3 e 6,6. A Figura 29 ilustra uma leve assimetria negativa. Os 25% dos dados menores que o 1º quartil, apresenta uma amplitude maior que os 25% dos dados que são maiores que o 3º quartil (amplitude de 1,4). A mediana (6,3) encontra-se visivelmente deslocada para cima, ou seja, a distância entre o 1º quartil e a mediana é bem maior que a distância entre a mediana e o 3º quartil, mesmo que possuam o mesmo número de amostras.

Quanto ao permeado, observa-se na Figura 29 que 50% das amostras ficam compreendidas entre 8,0 e 8,5, apresentado uma assimetria negativa. Os 25% dos dados menores que o 1º quartil (amplitude de 0,7), apresenta uma amplitude maior que os 25% dos dados que são maiores que o 3º quartil (amplitude de 0,4). A mediana (8,4) encontra-se deslocada para cima. E a média aparentemente sobreposta ao valor do 1º quartil, proveniente dos outliers.

A fim de verificar a veracidade dos resultados obtidos pela análise foi aplicada a ANOVA, para a comprovação destes efeitos. De acordo com o teste F (Tabela 11), foram encontradas evidências de diferenças significativas, visto que o valor-P é menor que o nível

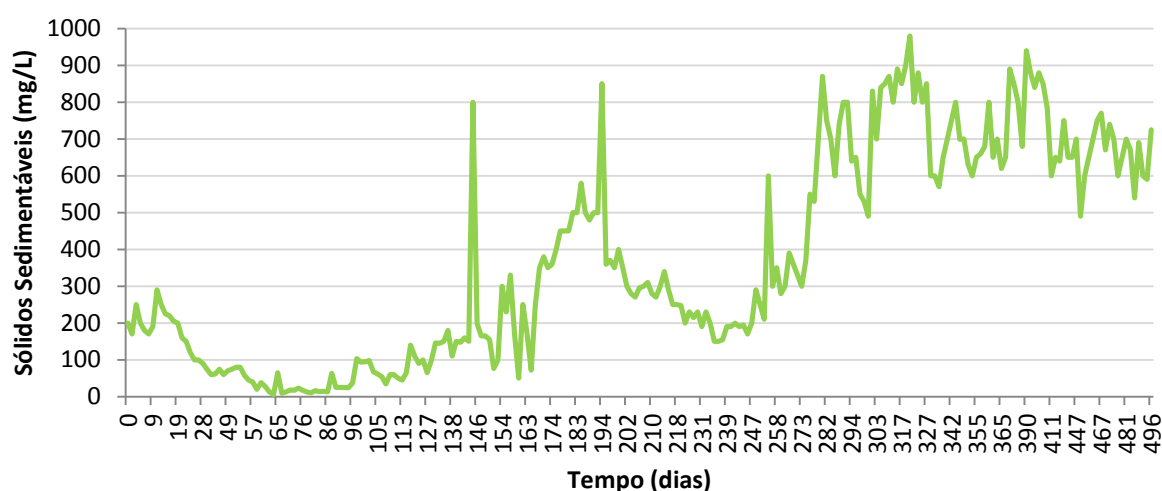
de significância utilizado de 0,05. Para o pH foi verificado um $F_{\text{calculado}}$ (69,39) maior que o valor $F_{\text{crítico}}$ (3,05), rejeitando a hipótese de nulidade H_0 . Logo, existe pelo menos uma diferença significativa entre as médias do pH do efluente e do pH do permeado. E conforme verificado na Figura 29 há um aumento na média do pH de 6,0 para 8,0, o efluente deixa a faixa ácida para alcalina, atendendo os preceitos da Resolução CONAMA 357/2005 e da NBR 13969 (ABNT, 1997) que estabelece as classes de reúso.

Tabela 11 – ANOVA do pH

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	139,4103	2	69,70514	69,39106	1,46E-22	3,051127
Dentro dos grupos	164,7423	164	1,004526			
Total	304,1526	166				

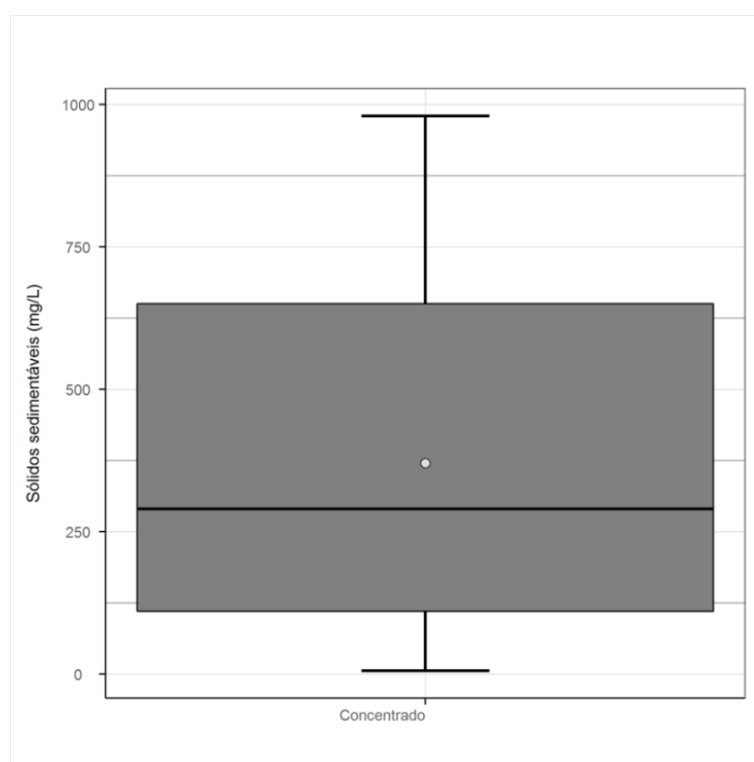
Uma das análises realizadas foi a de sólidos sedimentáveis do concentrado (lodo), que apresentou uma inconstância na distribuição dos valores encontrados ao longo das análises, como representa a Figura 30, indicando a sensibilidade dos microrganismos. Qualquer modificação sofrida pelo efluente industrial, proveniente de lavagens de equipamentos ou por algum motivo de dosagens diferenciadas ou falhas ao longo dos processos operacionais da indústria, são responsáveis pela falta equilíbrio no crescimento do lodo.

Figura 30 – Sólidos Sedimentáveis do concentrado



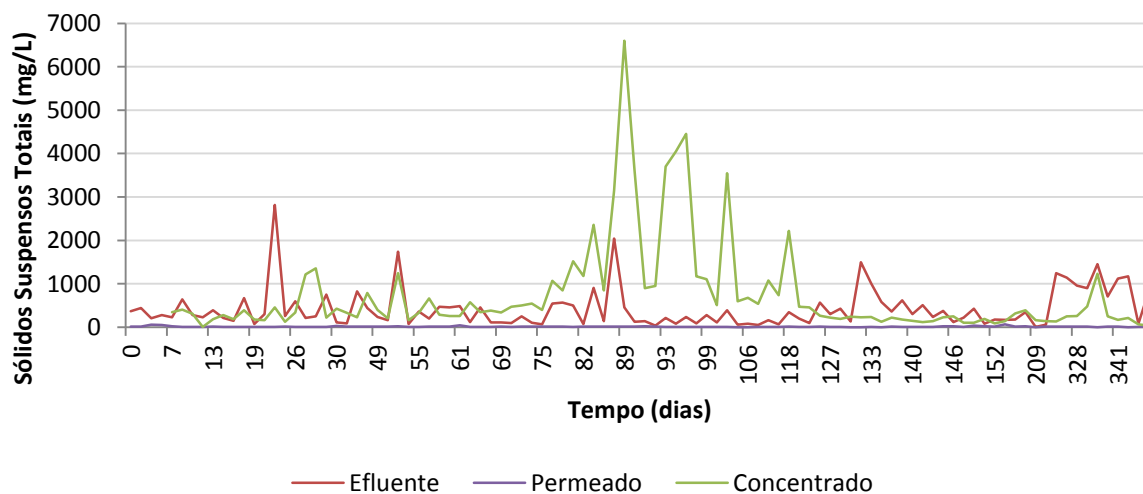
A Figura 31 ilustra o comportamento dos sólidos sedimentáveis do concentrado situado dentro do BRM, sendo 50% dessas amostras compreendidas entre 110 e 650 mg/L. É notório uma assimetria (positiva), comprovado por meio de informações como a distância do limite inferior até o 1º quartil corresponde a amplitude de 104 mg/L, enquanto que a do limite superior ao 3º quartil equivale a 330 mg/L. A média superior a mediana, sendo de 370 mg/L, além de que a mediana (290 mg/L) encontra-se visivelmente deslocada para baixo, ou seja, a distância entre o 1º quartil e a mediana é menor que a distância entre a mediana e o 3º quartil.

Figura 31 – BoxPlot do comportamento dos sólidos sedimentáveis no concentrado



Os sólidos suspensos totais é um indicador de qualidade da água, que determina a quantidade de material particulado presente na amostra, os valores verificados estão representados na Figura 32. Os sólidos suspensos totais apresentam variações ao longo do monitoramento, porém, é perceptível que no concentrado a variação é maior no 64º a 120º dia de monitoramento, sobressaindo aos valores encontrados no efluente da indústria, este último, apresentando uma variação menos intensa, mesmo com essas variações o permeado analisado possui ótimo resultado, apresentando uma eficiência satisfatória.

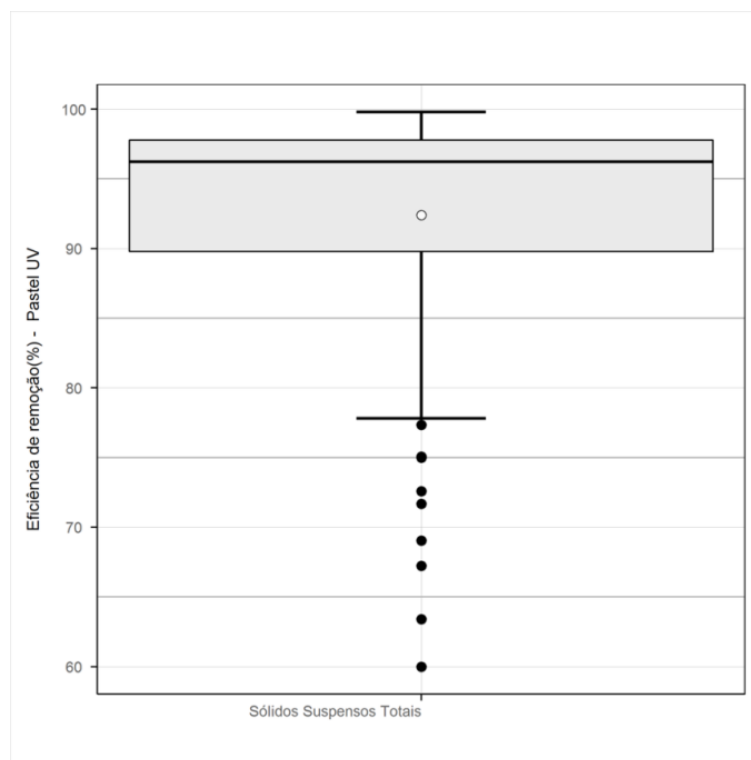
Figura 32 – Sólidos Suspensos Totais



Este aumento no concentrado tende a ser elevado devido ao acréscimo do efluente ao lodo contido no BRM, assim, com a entrada de matéria orgânica há o aumento na degradação da mesma, elevando a concentração de sólidos.

A partir desses dados foi possível determinar a eficiência de remoção para este parâmetro, como mostra a Figura 33, identificando que 50% dos valores de eficiência calculada para o sólido suspenso total ficam compreendidas entre 89,8 e 97,8%. O gráfico apresenta uma assimetria negativa. Os 25% dos dados menores que o 1º quartil (amplitude de 12%), apresenta uma amplitude maior que os 25% dos dados que são maiores que o 3º quartil (amplitude de 2%). A mediana (96,2%) encontra-se deslocada para cima e a média (92,4%) inferior a mediana, ou seja, a distância entre o 1º quartil e a mediana é maior que a distância entre a mediana e o 3º quartil. Por mais que essas distâncias sejam diferentes, o número de amostras entre elas é igual para ambas.

Figura 33 – Eficiência de remoção dos Sólidos Suspensos Totais



Com a aplicação da ANOVA (Tabela 12), de acordo com o teste F, foram encontradas evidências de diferenças significativas, visto que o valor-P é menor que o nível de significância utilizado de 0,05. Para os sólidos suspensos totais foi verificado um $F_{\text{calculado}}$ (28,58) maior que o valor $F_{\text{crítico}}$ (3,03) dado pelo programa, rejeitando a hipótese de nulidade H_0 . Logo, existe pelo menos um contraste significativo entre as médias. Comprovando que há diferenças significativas entre a concentração de DQO do efluente e DQO do permeado. Logo, a eficiência mensurada para este parâmetro é válida estatisticamente.

Tabela 12 - ANOVA dos SST

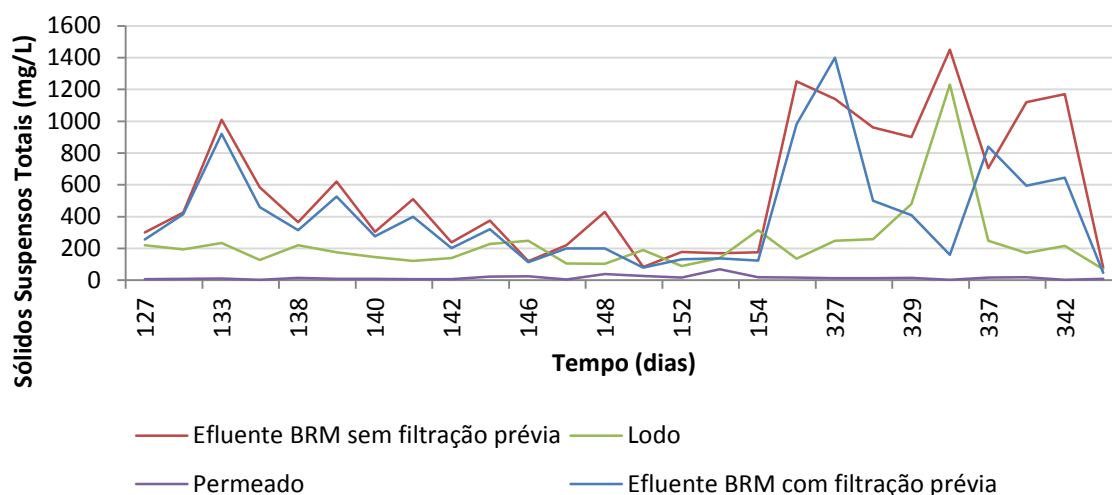
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	26179450	2	13089725	28,5795	4,58E-12	3,026572
Dentro dos grupos	1,34E+08	293	458011			
Total	1,6E+08	295				

Com o intuito de verificar a influência que uma filtração simples pode provocar nas amostras de efluentes das análises de sólidos suspensos totais, foram realizadas análises com amostras sem filtração e a mesma após uma filtração comum com papel de filtro. Observa-se

na Figura 34 uma redução dos sólidos entre as amostras, visto que parte dos sólidos ficam retidos nos filtros.

Porém não foi possível verificar a eficiência entre esses dois processos devido o permeado não ter sido coletado de forma individual para cada processo. Mesmo assim, a mudança de concentração do permeado é pouco provável, visto que os sólidos ficam retidos pela membrana de ultrafiltração dentro do BRM. Portanto o permeado não apresenta nenhuma ligação com os sólidos vindos pelos efluentes ou concentrado. A falta de manutenção do BRM, incluindo trocas de mangueiras, pode interferir nos resultados, visto que poderá ocorrer à formação de biofilmes nas paredes das mangueiras e estes podem ser carregados para dentro do efluente tratado.

Figura 34 – Comparação entre os efluentes não filtrados e os filtrados nas análises de sólidos suspensos totais

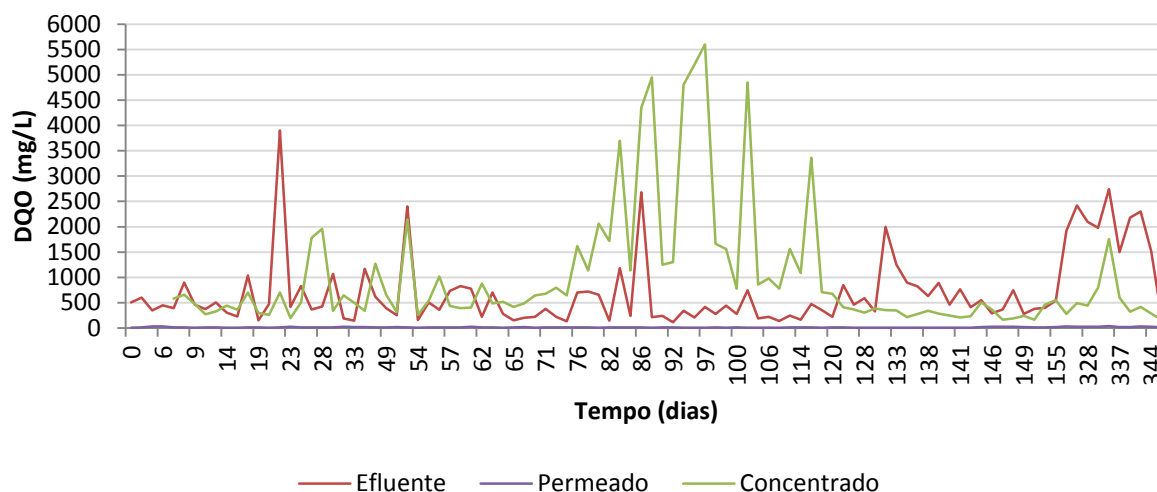


Durante o período de coletas também foram realizadas análises de DQO do efluente, do concentrado contido no lodo e do permeado com o intuito de caracterizar e verificar a eficiência do tratamento promovido pelo BRM de ultrafiltração.

Por meio do equipamento Pastel UV foi determinada as concentrações de DQO (mg/L) analisando o comportamento ao longo dos dias. Os picos são perceptíveis ao longo das análises (Figura 35). Uma vez que o sistema é mantido em batelada, ou seja, é alimentado por curtos intervalos de tempo, através de uma bomba peristáltica acoplada ao BRM, e o efluente que alimenta o BRM tem permanência na bombona por cerca de uma semana, o efluente tende a degradar antes mesmo de adentrar no sistema de BRM, uma vez que este efluente é

rico em matéria orgânica. Por motivos como estes, e operacionais da indústria, por exemplo, existe uma variação intensa dessas concentrações.

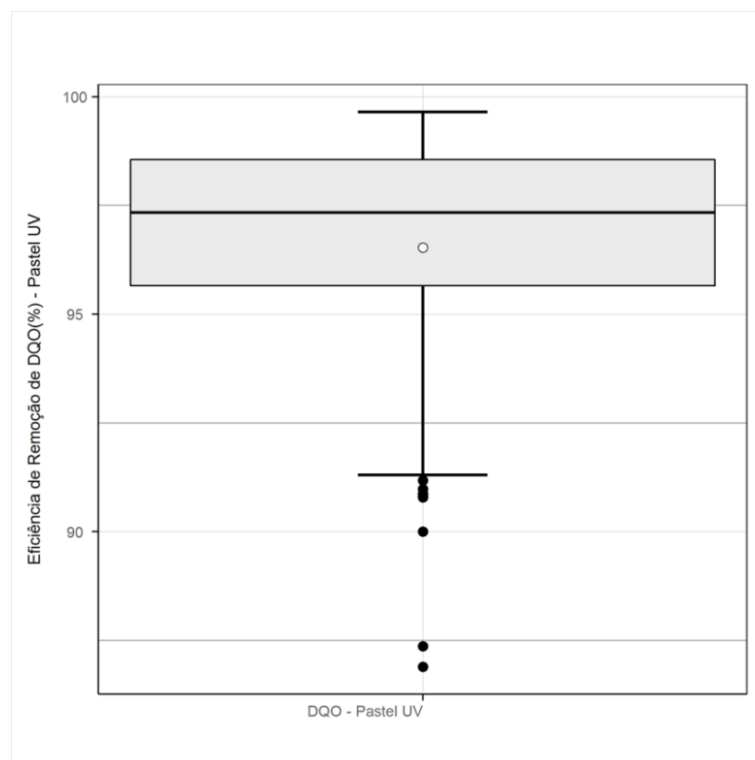
Figura 35 – Distribuição da DQO utilizando o Pastel UV



A partir desses dados foi possível calcular a eficiência de remoção para este parâmetro (Figura 36). Este identifica que 50% dos valores de eficiência calculada para a DQO fica compreendida entre 95,7 e 98,6%. O gráfico tenciona uma acentuada inclinação negativa, comprovado por meio de informações como a distância do limite inferior até o 1º quartil (linha inferior da caixa) corresponde a amplitude de 1,1%, enquanto que a do limite superior ao 3º quartil equivale a 4,4%. Portanto 25% dos dados menores que o 1º quartil, apresenta uma amplitude maior que os 25% dos dados que são maiores que o 3º quartil. A média é inferior a mediana, sendo de 96,5%, e a mediana (97,3%) encontra-se deslocada para cima, ou seja, a distância entre o 1º quartil e a mediana é maior que a distância entre a mediana e o 3º quartil, mesmo assim o número de amostras são iguais entre ambas as partes.

A Tabela 13 descreve os valores de DQO encontrados durante as análises através de um resumo descritivo sem a presença de outliers. Juntamente com a Figura 35 é possível visualizar um aumento da DQO dentro do BRM, em média o efluente industrial que alimenta o biorreator possui 706 mg/L e quando é introduzido no interior do BRM aumenta para 1018 mg/L, devido às atividades biológicas estarem em total atividade de degradação da matéria orgânica, da mesma forma que é perceptível ao permeado uma diminuição bastante significativa na DQO (13,9 mg/L).

Figura 36 - Boxplot da eficiência de remoção da DQO – Pastel UV



Contudo a média da eficiência foi de 96,5%, sendo superior ao encontrado por Subtil, Hespanhol e Mierzwa (2013) que foi de 95% para esgoto doméstico, e ao apresentado no estudo de Xing et al (2000) que foi atribuída a membrana uma eficiência de 85% de remoção.

Tabela 13 – DQO analisada através do Pastel UV

<i>DQO – Pastel UV</i>	<i>Mínima (mg/L)*</i>	<i>Máxima (mg/L)*</i>	<i>Média (mg/L)**</i>
Concentrado	152,0	2299,4	1018,0
Efluente	115,0	1679,0	706,0
Permeado	4,9	26,0	13,9
Eficiência	91,3	99,7	96,5

*Valores sem presença de outliers.

**Média representando o total de dados coletados.

Para a aplicação da ANOVA (Tabela 14), de acordo com o teste F, foram encontradas evidências de diferenças significativas, visto que o valor-P é menor que o nível de significância utilizado de 0,05. Para a DQO no pastel UV foi verificado um $F_{\text{calculado}}$ (39,01)

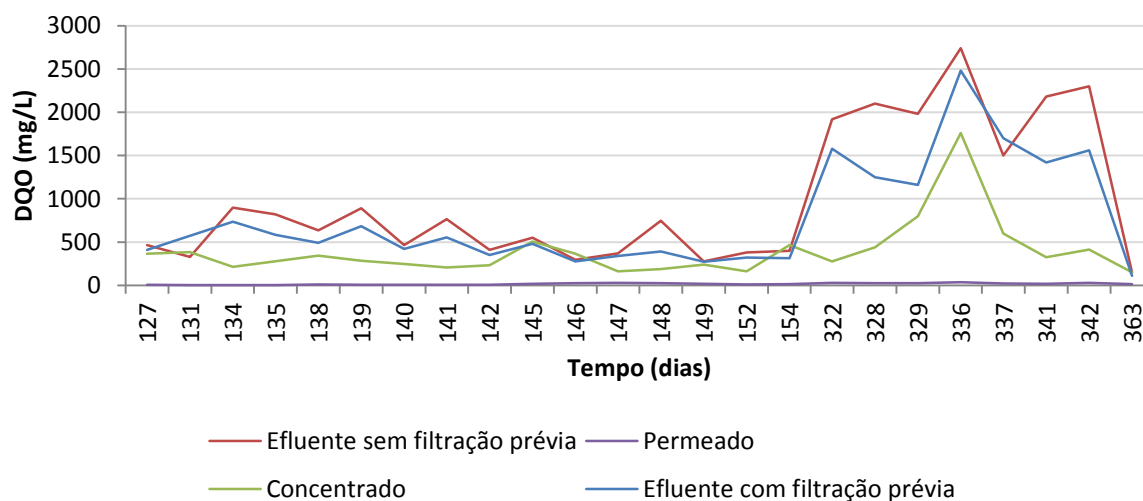
maior que o valor $F_{\text{crítico}}$ (3,03) dado pelo programa, rejeitando a hipótese de nulidade H_0 . Logo, existe pelo menos um contraste significativo entre as médias. Comprovando a eficiência de remoção desse parâmetro no tratamento biológico de membrana de ultrafiltração.

Tabela 14 – ANOVA da DQO no Pastel UV

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	50578887	2	25289443	39,01124	1,06E-15	3,027443
Dentro dos grupos	1,85E+08	285	648260,4			
Total	2,35E+08	287				

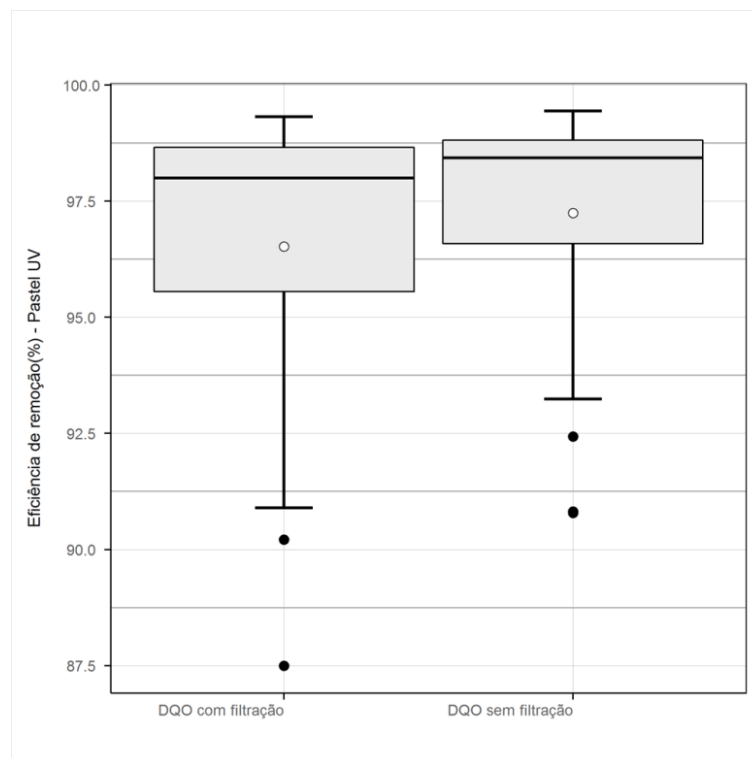
Ainda foi analisado entre os dias 127 e 363 a DQO da mesma amostra de efluente sem filtração e após filtração prévia ao tratamento biológico no BRM. A fim de verificar os efeitos e influências dessa filtração, a Figura 37 indica a distribuição da DQO quanto ao efluente sem e com filtração, é possível observar que com a retenção dos sólidos suspensos por meio da filtração prévia há um decaimento na DQO do efluente.

Figura 37 - Período de análises de DQO utilizando o Pastel UV em amostras sem filtração e com filtração



A Figura 38 ilustra que 50% das eficiências calculadas para a DQO filtrada e não filtrada ficam compreendidas respectivamente entre 95,6 e 98,7%, e 96,6 e 98,8%.

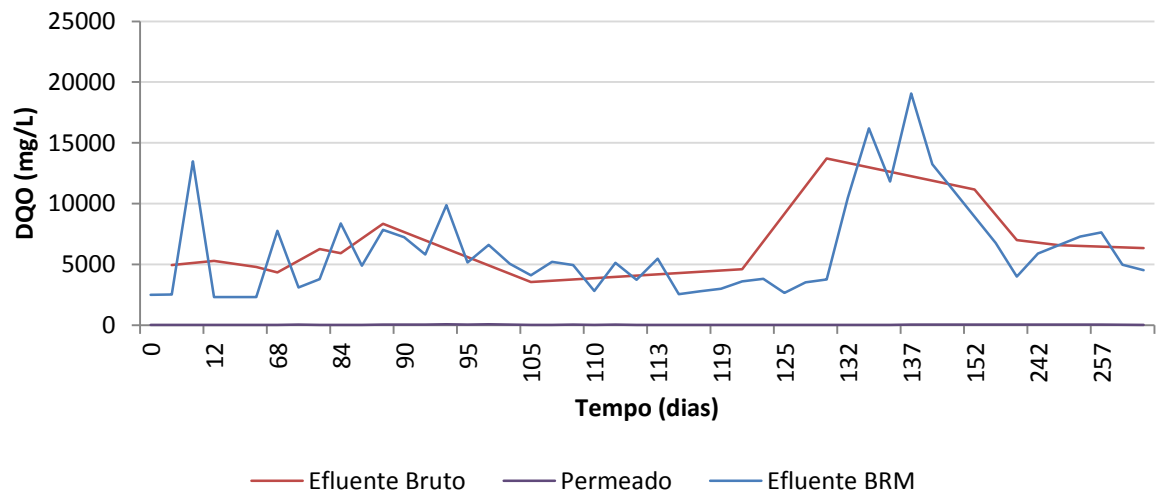
Figura 38 – BoxPlot da eficiência de remoção da DQO analisada através do equipamento Pastel UV para as amostras filtradas e não filtradas



A DQO, ainda foi analisada pelo método convencional com auxílio dos alfa kits, a fim de comprovar por outra metodologia a eficiência de remoção da DQO pelo BRM de ultrafiltração, e também acompanhar juntamente com as análises de nitrogênio e fósforo o nível de nutrientes e promover a melhoria do sistema com a adição de nutrientes para manter o meio mais equilibrado. Logo as análises foram realizadas com o efluente bruto, vindo direto da indústria e com o efluente adicionado nutrientes.

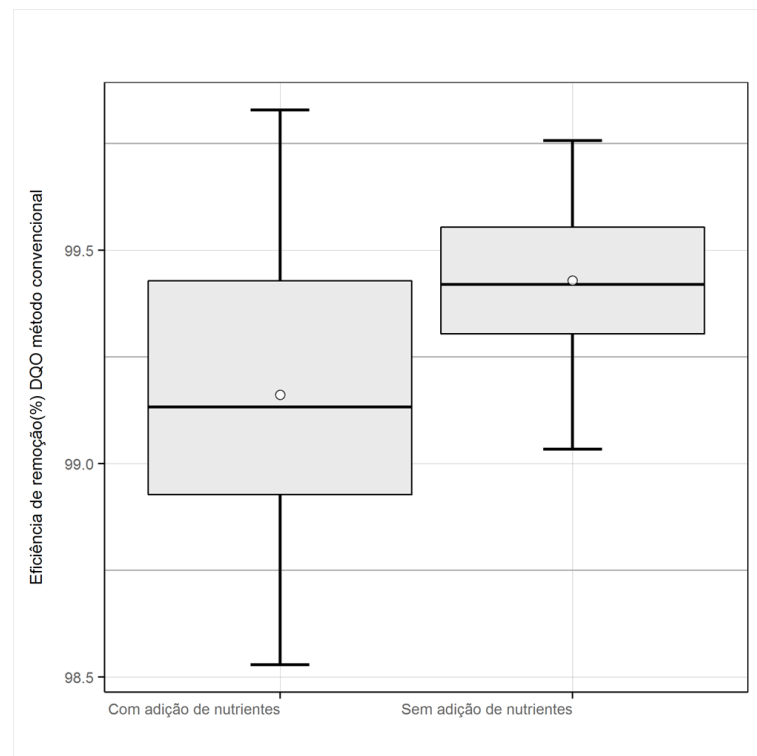
É notória que ainda assim existe uma variação apreciável da DQO durante o período de análises (Figura 39). Porém o BRM promoveu uma eficiente remoção de DQO (Figura 40), variando de 98,9% à 99,4% para as análises com adição de nutrientes e de 99,3 à 99,6% para as análises sem adição de nutrientes, com uma média de aproximadamente 99% para ambos tipos de amostras, referentes ao método colorimétrico de refluxo fechado. No entanto, a eficiência de remoção da DQO pelo método de Espectrofotômetro Pastel-UV (Figura 36) foi à mínima de 91,3%, a máxima de 99,7% e finalizando com uma média de 96,5%. Importante destacar que as análises referentes ao LCA foram em menor quantidade devido ao tempo de realização dessas análises terem sido mais curtas.

Figura 39 - DQO analisada pelo método colorimétrico de refluxo fechado



Na Figura 40, observa-se que os efluentes tiveram baixíssima variação em seus valores de eficiência quanto a remoção da DQO, indicando que o método é bastante eficiente para tratar efluentes com altas ou baixas concentrações de nutrientes.

Figura 40 – Eficiência de remoção de DQO entre os efluentes com e sem adição de nutrientes



A aplicação da ANOVA (Tabela 15), de acordo com o teste F, foram encontradas evidências de diferenças significativas, visto que o valor-P é menor que o nível de significância utilizado de 0,05. Para a DQO convencional foi verificado um $F_{\text{calculado}}$ (63,31) maior que o valor $F_{\text{crítico}}$ (3,09) dado pelo programa, rejeitando a hipótese de nulidade H_0 . Logo, existe pelo menos um contraste significativo entre as médias. Comprovando estatisticamente que a remoção da DQO pelo método convencional foi eficiente.

Tabela 15 – ANOVA da DQO convencional

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	9,46E+08	2	4,73E+08	63,30905	2,24E-18	3,089203
Dentro dos grupos	7,32E+08	98	7472122			
Total	1,68E+09	100				

Com esses estudos obteve-se uma eficiência de remoção de DQO variando no pastel UV de 91,30% a 99,65% e na forma convencional de 99% esses valores são superiores aos encontrados por Mellin et al. (2006) que estavam compreendidos entre 89% e 98% e aos encontrados por Honaiser et al. (2016) que foram de 75,49% a 89,55%.

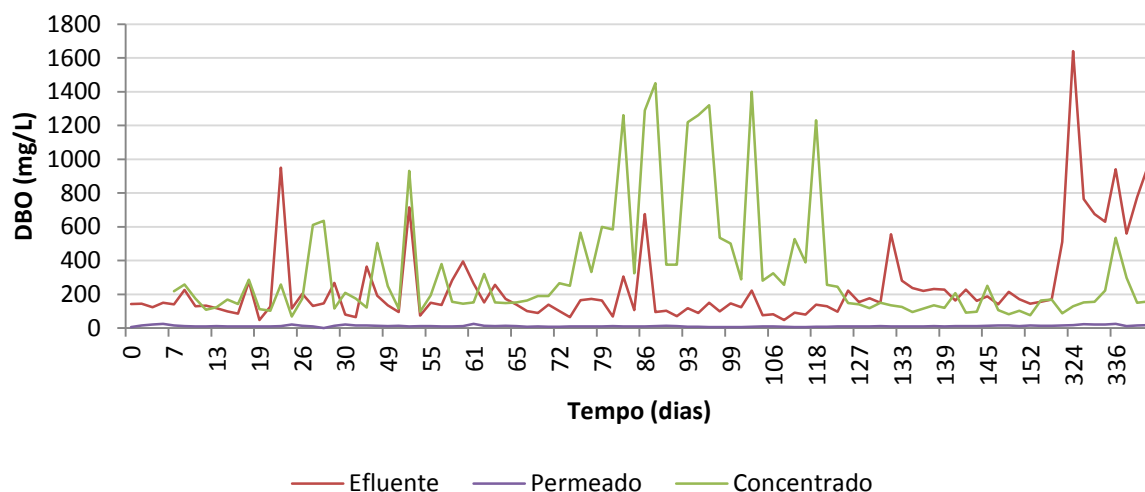
Para obter um controle do sistema biológico de tratamento foram feitos testes de DBO, este medindo a matéria orgânica pelo consumo de oxigênio, sendo definida como a quantidade de oxigênio necessária para que os microrganismos biodegradem a matéria orgânica contida em um litro de amostra. As fases da DBO são a carbonácea e a nitrogenada, e são desenvolvidos por meio dos compostos nitrogenados contidos nas amostras, principalmente nos efluentes de indústrias alimentícias, produtos saneantes e farmacêuticos, onde estes são biodegradados ocasionando uma demanda bioquímica de oxigênio.

Logo, a DBO pode ser utilizada para medir a eficiência do sistema em relação à remoção de matéria orgânica na forma biodegradável. As análises foram realizadas pela metodologia aplicada ao Pastel UV.

O comportamento da DBO durante o tempo de análises sofreram variações, com muitos picos (Figura 41). Sendo perceptível que entre os dias 65 ao 120 houve um crescimento acentuado na DBO, coincidindo com o aumento da rotação atribuída à bomba peristáltica para um teste de vazão da membrana, onde quando a bomba atingiu 17 rpm houve uma super carga de matéria orgânica. Relacionando o aumento da carga orgânica com uma influência direta na DBO. Da mesma forma que a adição de nutrientes no efluente para

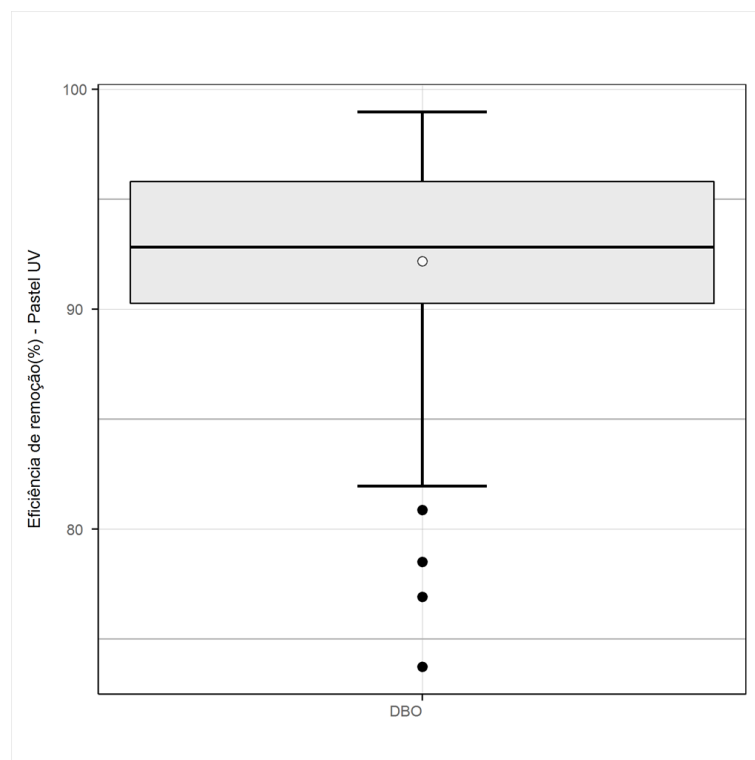
equilibrar o nitrogênio e o fósforo, aumentou a DBO do efluente como é indicado nos pontos 324 à 341.

Figura 41 – Distribuição da DBO utilizando o Pastel UV



Para este parâmetro de tratamento biológico foi calculada a eficiência de remoção (Figura 42), verificou-se os outliers e permitiu um resumo descritivo da eficiência de DBO em que metade das amostras ficaram compreendidas entre 90,3 e 95,8%, é observado uma inclinação negativa uma vez que a amplitude dos 25% dos valores menores que o 1º quartil é de 8,3% enquanto que nos 25% valores superiores que o 3º quartil é de 3,2 %. A mediana (92,8%) encontra-se próxima a média (92,2%) e de forma centralizada na caixa do gráfico.

Figura 42 – BoxPlot da eficiência de remoção da DBO no Pastel UV



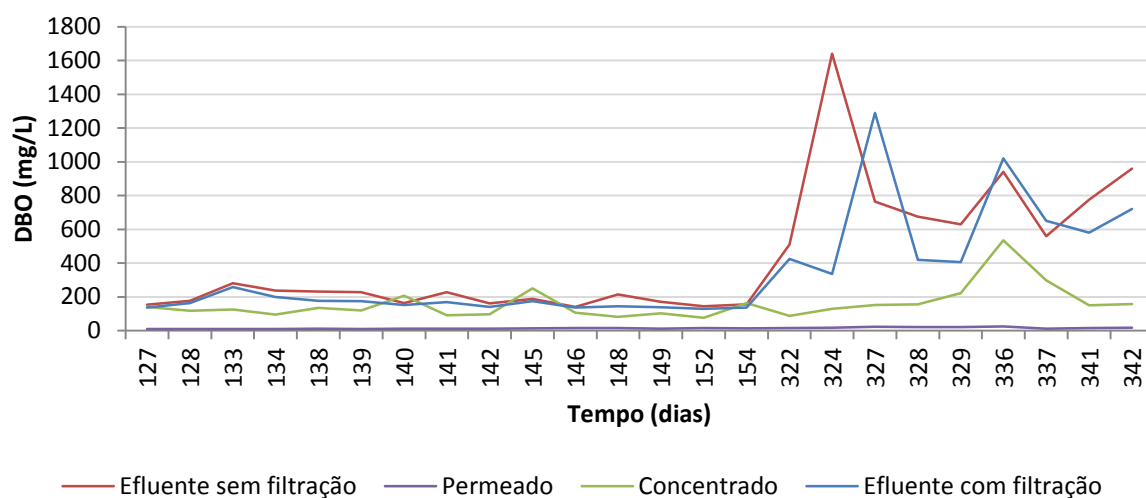
Com a aplicação da ANOVA (Tabela 16), de acordo com o teste F, foram encontradas evidências de diferenças significativas, visto que o valor-P é menor que o nível de significância utilizado de 0,05. Para a DBO foi verificado um $F_{\text{calculado}}$ (43,75) maior que o valor $F_{\text{crítico}}$ (3,03) dado pelo programa, rejeitando a hipótese de nulidade H_0 . Logo, existe pelo menos um contraste significativo entre as médias. Comprovando estatisticamente os valores médios da DBO pelo pastel UV anteriormente mostrados.

Tabela 16 – ANOVA da DBO no pastel UV

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5180609	2	2590304	43,75355	2,92E-17	3,028014
Dentro dos grupos	16576604	280	59202,16			
Total	21757212	282				

Os valores encontrados na remoção de DBO foram significativos variando entre 82% a 99%, seguindo os valores encontrados pelos estudos realizados por Subtil, Hespanhol e Mierzwa (2013).

Figura 43 - Gráfico da DBO com efluentes filtrados e não filtrados



Ainda foram realizadas algumas análises com a mesma amostra para o efluente filtrado e não filtrado (Figura 43), com o intuito de verificar os efeitos de uma filtração no efluente antes do tratamento biológico e apresentaram médias na eficiência de remoção de 93,9 e 95% respectivamente. Comprovando mais uma vez a interferência da retirada dos materiais particulados na degradação da matéria orgânica.

6. CONCLUSÕES

- O Biorreator de Membrana de Ultrafiltração apresentou-se eficiente para as atribuições de conservação dos recursos hídricos, sendo uma opção sustentável no tratamento biológico de efluentes (visando o reúso).
- O efluente industrial apresentou altos teores de matéria orgânica e sólidos em suspensão.
- O tratamento biológico por membrana de ultrafiltração apresentou uma eficiência para a remoção de sólidos suspensos totais de 92,4%, DQO pelo pastel UV de 96,5%, DQO convencional de 99% e DBO de 92,2%.
- A biomassa se mostrou bastante sensível às interferências do meio externo e ao tipo de efluente que alimentava o biorreator, a depender do tipo de fruta, horário de funcionamento e limpeza dos equipamentos.
- O permeado apresentou características que possibilita seu reúso em lavagem de piso e alguns equipamentos, além de descargas de bacias sanitárias. As demais atribuições exigem análises microbiológicas para verificar a remoção de organismos patogênicos.
- Há necessidade do desenvolvimento de legislação, normas e diretrizes que definam conceitos, parâmetros e restrições ao reúso das águas de forma mais detalhada. Impondo requisitos mínimos de qualidade da água de reúso em função das finalidades.

7. RECOMENDAÇÕES

Com base nas conclusões apresentadas, segue algumas sugestões para futuras pesquisas:

- Analisar os indicadores de capacidade de desinfecção do reator, como os patógenos no efluente bruto e no permeado a fim de verificar com mais precisão a remoção de patógenos que é típica na aplicação de membranas de ultrafiltração;
- Caracterizar quantitativamente o efluente gerado na indústria de processamento de frutas é importante conhecer o consumo de água em todos os setores da indústria, com instalações de hidrômetros para obter valores para um estudo mais aprofundado da viabilidade de reúso para cada setor especificamente;
- Fazer o uso da ferramenta *water pinch* para otimizar o uso da água na indústria, verificando a possibilidade de reúso da água, com base nos parâmetros de qualidade de água exigida em cada setor e unidade de operação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10561**: Águas - Determinação de resíduo sedimentável (sólidos sedimentáveis) - Método do cone de Imhoff - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1988. 2p.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20 th ed. Washington DC: APHA, 1999.

APTEL, P.; MOULIN, P.; QUEMENEUR, F. Micro et Ultrafiltration: Conduite des Essais Pilotes Traitements des Eaux et Effluents. **Les Cahiers du Club Français des Membranes** N°2. 102p, 2002.

ARABI, S. & NAKHLA, G. Impact of protein/carbohydrate ratio in the feed wastewater on the membrane fouling in membrane bioreactors. **Journal of Membrane Science**, v. 324, n. 1-2, 2008. P. 142-150.

_____. **NBR 13969**: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997. 60p.

_____. **NBR/ISO 22000**: Sistemas de gestão da segurança de alimentos - Requisitos para qualquer organização na cadeia produtiva de alimentos. Rio de Janeiro, 2006. 35p.

ACERO, J. L.; BENITEZ, F. J.; LEAL, A. I.; REAL, F. J.; TEVA, F. Membrane filtration technologies applied to municipal secondary effluents for potential reuse. **Journal of Hazardous Materials**, v.177, n.1-3, p.390-398, 2010.

Água hoje e sempre. Gráficos e Estatísticas do Consumo de Água Mundial. set. 2011. Disponível em<http://trabalhoserrano.blogspot.com.br/2011/09/graficos-e-estatisticas-do-consumo-de_05.html>. Acesso em: 12 ago de 2016.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. ANA Notícias. ANA divulga relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil – Informe 2014. **ANA**, mar. 2015. Disponível em <http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id_noticia=12683>. Acessado em: 03 set de 2016.

ANDRADE, L. H. **Tratamento de efluente de indústria de laticínios por duas configurações de biorreator com membranas e nanofiltração visando o reúso**. 2011. Tese de Doutorado. Masters Thesis, Post-Graduation on Sanitary and Environmental Engineering, Federal University of Minas Gerais, Brazil. 2011.

APHA, A. W. W. A. WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**, v. 22, 2012.

BARBOSA, I. L. **Avaliação de processos de separação por membranas para geração de águas de reúso em um centro comercial**. 2009. 109f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2009.

BARROS FILHO, M. A. C. **Influência da pressão e da vazão de concentrado sobre o desempenho de ultrafiltração no pós-tratamento de esgotos**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Natal, 2015. 58 f.

BEAL, L. L. **Tratamento anaeróbico de efluente de curtume de acabamento associado à membranas de micro e ultrafiltração**. 2004. 313f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2004.

BELLI, T. J. **Biorreator à membrana em batelada sequencial para a remoção de nutrientes de esgoto sanitário: desempenho do tratamento, colmatção das membranas e estratégias de otimização**. 2015. 275f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

BEN AIM, R. M.; SEMMENS, M. J. Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment and Reuse: A Success Story. **Water Science and Technology**, v.47, n.1, p.1-5, 2002.

BERNHARD, M.; MÜLLER, J.; KNEPPER, T. P. Biodegradation of persistent polar pollutants in wastewater: Comparison of an optimised lab-scale membrane bioreactor and activated sludge treatment. **Water Research**, v. 40, p.3419-3428, 2006.

BRASIL, Lei das Águas. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional**, 1997.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. 1986. Resolução CONAMA 20/1986. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 jun. 1986.

BRASIL. Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 8 out. 2016.

BRASIL. Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. O Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. Que estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 09 mar. 2006.

BRASIL. Resolução nº 121, de 16 de dezembro de 2010. Estabelece diretrizes e critérios para a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola florestal, definida na Resolução CNRH nº 54 de 28 de novembro de 2005. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 16 dez. 2010.

BRASIL, T., Instituto Trata Brasil. **Situação Saneamento no Brasil**. 2015. Disponível em <<http://m.tratabrasil.org.br/saneamento-no-brasil>>. Acesso em: 05 out de 2016.

BREGA FILHO, D. & SANCHES MANCUSO, P. C. Conceito de reúso de água. In.: P. C. SANCHES MANCUSO & H. F. DOS SANTOS, eds. **REÚSO DE ÁGUA**. São Paulo: Manole, p. 21-36, 2003.

BRIÃO, V. B.; TAVARES, C. R. G. Ultrafiltração de água de enxágue modelo da indústria de laticínios para a recuperação de nutrientes: efeito da pressão e da velocidade tangencial. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.15, n.4, p. 362-362, 2012.

CARDOT, C. **Lês Traitements de L'eau**. Ellipse Édition Marketing, 1999.

CASAN. **Saúde Pública: ETE – lodos ativados: valo de oxidação**. Disponível em: <www.casan.com.br/saude_etc_valo.htm>, Acesso em: 25 fev. 2002.

CASANI, S.; ROUHANY, M.; KNØCHEL, S. A discussion paper on challenges and limitations to water reuse and hygiene in the food industry. **Water research**, v. 39, n. 6, p. 1134-1146, 2005.

CASTRO, C. F. A.; SCARIOT, A. **Escassez de água, uma crise silenciosa**: Estoques de água doce estão sendo diminuídos pelo despejo diário de 2 milhões de toneladas de poluentes, alertam especialistas do PNUD. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Brasília-DF, 2005. Disponível em: <http://www.pnud.org.br/noticia.aspx?id=3509#*>. Acesso em 04 set. 2016.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Guia de coleta e preservação de amostras de água**. CETESB, 1988

COSTA, R. H. P. G. Água: matéria-prima primordial à vida. **Reuso da água: conceitos teorias e práticas**. São Paulo: Blücher, 2007.

CNRH Resolução nº 121/2010

_____. **NBR 13969**: Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação. RJ, set. 1997.

_____. Resolução nº 20, de 18 de junho de 1986. Ministério do Meio Ambiente, 15p.

DE ALMEIDA, R. G. Aspectos legais para a água de reúso. **Revista Vértices**, Campos dos Goytacazes, v. 13, n. 2, p. 31-43, 2011.

DEFRANCE, L.; JAFFRIN, M.Y. Comparison between filtration at fixed transmembrane pressure and fixed permeate flux: application to a membrane bioreactor used for wastewater treatment. **Journal of Membrane Science**. 152, 203-210. 1999.

DRIOLI, E.; ROMANO, M. Progress and new perspectives on integrated membrane operations for sustainable industrial growth. **Industrial Engineering Chemical Research**, v.40, n.5, p.1277-300, 2001.

ELMALEH, S.; ABDELMOUMNI, L. Experimental Test to Evaluate Performance of an Anaerobic Reactor Provided with an External Membrane Unit. **Water Science and Technology**, v.38, n.8-9, p. 385-392, 1998.

EUROPA SHOPPING HOUSE – Tecnologia HF – Hollow Fibre (Membranas de Fibra Oca. Disponível em: <<http://www.europashoppinghouse.com.br/filtros-europa/tecnologia-hf.php>>. Acesso em: 04 out de 2016.

FEC/UNICAMP – FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO/UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Filtros biológicos. UNICAMP. Disponível em <<http://www.fec.unicamp.br/~bdta/esgoto/filtrosbiologicos.html>>. Acesso em: 22 set. 2016.

FERREIRA, E. S. **Cinética química e fundamentos dos processos de nitrificação e desnitrificação biológica**, In: Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 27, 2000. Porto Alegre. Anais. ABES: Rio de Janeiro. 2000.

GANDER, M.; JEFFERSON, B., JUDD, S., Aerobic MBRs for Domestic Wastewater Treatment: A Review with Cost Considerations. **Separation and Purification Technology**, v. 18, pp.119-130.

GEAFILTRATION, 2006. Disponível em: <http://www.geafiltration.com/Portuguese/Tecnologia/Tipos_de_Mh>; <http://www.geafiltration.com/Portuguese/glossario_de_terminologias_em_filtracao.asp>. Acesso em: 11 abr de 2016.

GHIGGI, F. F. **Tratamento de águas para Consumo doméstico com membranas de ultrafiltração**. 2011. 39f. Diplomação em Engenharia Química – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2011.

GIACOBBO, A. **Biorreator à membrana aplicado ao tratamento de efluentes**. 2010. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS. 2010.

GIORDANO, G.; SURERUS, V. **Efluentes industriais: Estudo de tratabilidade**. 1. Vol. Rio de Janeiro: Publit, 2015. 196p.

GRELIER, P.; ROSEMBERGER, S.; TAZI-PAIM, A. Influence of sludge retention time on membrane bioreactor hydraulic performance. **Desalination**, n.192, 10-17 p., 2006.

GUO, H.; WYART, Y.; PEROT, J.; NAULEAU, F.; MOULIN, P. Low-pressure membrane integrity tests for drinking water treatment: a review. **Water Research**, v.44, p. 41-57, 2010.

HABERT, A. C. **Processos de separação por membranas**. (Vol. 3). Editora E-papers, 2006.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NÓBREGA, R. **Introdução aos Processos de Separação por Membranas**, Curso Ministrado na Escola Piloto em Engenharia Química, COPPE/UFRJ, 1997.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NÓBREGA, R. **Processos de separação com membranas**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Escola piloto em engenharia química, COPPE, UFRJ, 2006. 180 p.

HESPANHOL, I. **Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos**. Bahia Análise & Dados, v. 13, n. especial, p. 411-437, 2003.

HESPANHOL, I. Um novo paradigma para a gestão de recursos hídricos. **Estudos Avançados – Scielo**, v. 22, n. 63. 2008.

HONAISSER, C.; BIAZUS B. L.; BUTZEN, E. L.; BRIÃO, V. B. **Biorreator a membrana para tratamento de efluente sanitário**. In: III Semana do Conhecimento, 2016, Rio Grande do Sul. Universidade de Passo Fundo, 2016.

IWAKI, G. P. Disponível em: <<http://tratamentodeagua.com.br/artigo/reuso-de-agua-tipos-processos-especificos-e-contaminantes/>>. Acesso em: 22 nov de 2015

JEONG, T. Y. *et al.* Characteristics of bio-fouling in a submerged MBR. **Desalination**, v. 207, n 1-3, p. 107-113. 2007.

JORDÃO, E. P., PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgoto doméstico**. 4a ed. ABES. Rio de Janeiro, Brasil. 2005. 932 p.

JUDD, S. The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment. 1º ed – **Elsevier Ltd**, Oxford, UK, 2006.

JUDD, S. The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatmentt. **Elsevier**, Second Edition, 2011.

KOROS, W. J.; MA, Y. H.; SHIMIDZU, T. Terminology for membranes and membrane processes. **Journal of Membrane Science**. v.20, p.149-159, 1996.

KWANG-HO, C.; CHUNG-HAK, L. Membrane Fouling Mechanisms in the Membrane-Coupled Anaerobic Bioreactor. **Water Research**, v.30, n.8, p.1771-1780, 1996.

LACOSTE, B. **Étude d'un procédé de traitement des eaux usées sur membranes minérales par couplage microfiltration ou ultrafiltration tangentielles et systèmes biologiques en aérobiose**. 1992. 227p. Thèse (Doctorat) – Université de Montpellier II, Montpellier-France. 1992.

LAPOLLI, F. R. **Biofiltração e microfiltração tangencial para tratamento de esgotos sanitários**. 1998. 186p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, 1998.

LENS, P.; POL, L. H.; WILDERER, P. A. & ASANO, T. **Water recycling and resource recovery in industry: analysis, Technologies and implementation**. 1st. Ed. London: IWA, 2002.

MACÊDO, A. B. **Águas de Águas**. São Paulo: Livraria Varela, 2001.

MAESTRI, R. S. **Biorreator à membrana como alternativa para o tratamento de esgotos sanitários e reúso da água**. 2007. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2007.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F., **Reúso de Água**, Editora Malone Ltda, - São Paulo, 2003, 576p.

MARENGO, J. A. **Água e mudanças climáticas**. V. 22 São Paulo: Estudos Avançados. 2008 n. 63, p. 83-96.

MASSOT, A., MIETTON-PEUCHOT, M. PEUCHOT, C., MILISIC, V. Nanofiltration and reverse osmosis in winemaking. **Desalination**, 231, pp. 283-289, 2008.

MELCHIOR, S. C.; CAMARGO, M. de L.; CONEGLIAN, C. M. R.; BRITO, N. N., LOPES, T. A.; BARROS, R. de M.; SOBRINHO, G. D.; TONSO, S.; PELEGRINI, R. **Tratamento de efluentes por lodos ativados**. In: III Fórum de Estudos Contábeis das Faculdades Integradas Claretianas, Rio Claro. Anais... Rio Claro: Faculdades Integradas Claretianas, 12 p. 2003.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 3ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 1334 p.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering – Treatment and Reuse**. Fourth Edition, New York, 2003. 1819 p.

MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. **Água na indústria: uso racional e reúso**. São Paulo. Ed: Oficina de Textos, 2005. p.,144.

MINHALMA, L. M. **Síntese e Optimização de Processos de Recuperação de Águas Residuais Industriais com Integração de Ultrafiltração e Nanofiltração**. Tese (Doutorado) – Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico. 2001.

MONTEGGIA, L. O.; DE LUCA, S. J. **Outros processos de desinfecção**. In: Desinfecção de efluentes sanitários, por GONÇALVES, R. F. (coord.) et. al., Rio de Janeiro: ABES, 2003.

MUCELIN, C. A.; **Estatística elementar e experimental aplicada às tecnologias**. 2ª ed, medianeira – Pr: VALERIO, 2006.

MULDER, M. **Basic principles of membrane technology**. 2nd. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003.

NALCO., **The Nalco water handbook**. 2 Mc Graw Hill. 1-21.

NITTO – Innovation for Customers. Disponível em:<https://www.nitto.com/br/pt/products/group/membrane/about/spiral_module/>. Acesso em: 08 set de 2016.

NORDELL, E. **Water treatment for industrial and other uses**. 2. ed. New York: Reinhold Publishing Corp., 1961. 598 p.

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário: Coleta, transporte tratamento e reúso**. São Paulo, Brasil: Editorial Edgard Blücher Ltda, p. 520, 2003.

NUVOLARI, A.; COSTA, R. H. P. G. **Tratamento de efluentes**. TELLES, D. D; COSTA, RP **Reúso da Água: Conceitos, Teorias e Práticas**. São Paulo: Editora Blucher, 2010. p. 51-152.

ONU – Organização da Nações Unidas. Até 2050, um bilhão de pessoas viverão em cidades sem água suficiente, diz Banco Mundial. ONU, 2015. Disponível em <<https://nacoesunidas.org/ate-2050-um-bilhao-de-pessoas-viverao-em-cidades-sem-agua-suficiente-diz-banco-mundial/>>. Acesso em: 10 mar de 2016.

PELEGRIN, D. C. **Microfiltração tangencial de efluente sanitário após tratamento biológico**. 2004. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2004.

PENA, R. F. A. **CONSUMO DE ÁGUA NO MUNDO**. BRASIL ESCOLA. Disponível em:<<http://brasilescola.com/geografia/consumo-de-agua-no-mundo.htm>>. Acesso em 26 nov. 2015.

PEPPIN, S. S. L.; ELLIOT, J. A. W. Non-equilibrium thermodynamics of concentration polarization. **Advances in Colloid and Interface Science**, v.92, p.1-72, 2001.

PETRUS, J. C. C. **Preparação, modificação e caracterização de membranas assimétricas para clarificação de suco de frutas**. 1997. 139f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos)Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 1997.

PIELOU, E. C. **Fresh water**. University of Chicago Press, 1998.

PROVENZI, G. **Biorreator à Membrana Submersa para Tratamento Biológico de Efluentes**: Estudos hidrodinâmicos e físico-químicos no controle da colmatação. Tese do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, 2005.

RADJENOVIC, J. et al. Membrane bioreactor (MBR) as an advanced wastewater treatment technology. In: **Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste**. Springer Berlin Heidelberg, v. 5, 2008. p.37-101.

ROCHA, G. M.; PEREIRA, I. C. N. POPULAÇÃO E RECURSOS: CRESCIMENTO POPULACIONAL E O USO DOS RECURSOS HÍDRICOS NA CIDADE DE TUCURUÍ/PA. “A produção da informação geográfica para a gestão municipal da água: o emprego da tecnologia sig na caracterização e monitoramento do uso múltiplo dos recursos hídricos na cidade de Tucuruí (Pa)”. 2015.

RODRIGUES, R. dos S. **As Dimensões Legais e Institucionais de Reúso de Água no Brasil: Proposta de Regulamentação do Reúso no Brasil**, 2005. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2005.

SALATI, E.; LEMOS, H. M.; SALATI, E. Água e o desenvolvimento sustentável. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B; TUNDISI, J. G. (Org.) **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3 ed. São Paulo: Escrituras, 2006.

SCHNEIDER, R. P., TSUTIYA, M. T., **Membranas Filtrantes para o Tratamento de Água, Esgoto e Água de Reúso**. 1 ed., São Paulo, Brasil, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2001.

SCOTT, K. Handbook of Industrial Membranes. **Elsevier Advanced Technology**, 1 ed, Oxford, UK, 912p., 1997.

SETTI, MCBC. **Reúso de Água: Condições de Contorno**. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)–Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1995.

SHREVE, R. N. BRINK Jr., A. **Indústria de processos químicos**, Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois, 1980.

SILVA, G. A. da; SIMOES, R. A. G. **Água na indústria**. p. REBOUÇAS, AC BRAGA, B. & TUNDISI, JG (eds.) **Águas Doces no Brasil**, 1999. p. 339-368.

SMOLDERS, C. A.; MULDER, M. H. V.; VAN DER VELDEN, P. M. A survey of structure characterization methods for ultrafiltration and reverse osmosis membranes. **Desalination**, 19, pp. 481-491, 1976.

SOUSA, C. A. **Tratamento termofílico aeróbio de efluente de máquina de papel utilizando biorreator a membranas**. 2008. 127f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

STREIT, K. F. **Estudo da aplicação de processos de separação com membranas no tratamento de efluentes de curtume: nanofiltração e eletrodialise**. 2011. 182f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2011.

SUBTIL, E. L.; HESPANHOL, I.; MIERZWA, J. C.. Biorreatores com membranas submersas (BRMs): alternativa promissora para o tratamento de esgotos sanitários para reúso. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 8, n. 3, 2013.

TELLES, D. A., COSTA, R. H. P. G. **Reúso da água: conceitos, teorias e práticas**. 1ª edição. São Paulo: Blücher, 2007.

TELLES, D. A., COSTA, R. H. P. G. **Reúso da água: conceitos, teorias e práticas**. 2ª edição. São Paulo: Blücher, 2010. 408 p.

TETRAPAK. Tipos de membranas. Disponível em: <<http://www.tetrapak.com/cl/processing/membrane-filtration/membrane-types>>. Acesso em 05 out de 2016.

TORRES, A.P. Tratamento e reúso de efluentes líquidos – PETROBRÁS/CENPES. III Congresso Brasileiro de eficiência energética e Co-geração de energia. São Paulo, Junho, 2006.

TUNDISI, J. G. O Futuro dos Recursos: Recursos Hídricos. **MultiCiência**, v.1. 2003.

TUNDISI, J. G. Novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos. **Revista USP**, n. 70, p. 24-35, 2006.

UNESCO. **RELATÓRIO MUNDIAL DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE DESENVOLVIMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS 2016**. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002440/244040por.pdf>> Acesso em: Água , economia e emprego – 12 set. 2016.

VIANA, P. Z. **Biorreator com membrana aplicado ao tratamento de esgotos domésticos: avaliação do desempenho de módulos de membranas com circulação externa**. 2004. 175f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 2004.

VIDAL, C. M. S. **Avaliação de microfiltração tangencial como alternativa de tratamento avançado de efluente gerado em sistema de tratamento de esgoto sanitário constituído de reator UASB (upflow anaerobic sludge blanket) seguido de tanque de aeração**. 2006. 193f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2006.

VISVANATHAN, C.; AIM, R.B.; PARAMESHWARAN, K. Membrane separation bioreactors for wastewater treatment. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 30(1): 1-48, 2000.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. In: **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 1995.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte, Editora UFMG, 1996.

VON SPERLING, E. **Qualidade de água**. Brasília. Belo Horizonte: ABEAS. 1997.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 452 p.

WESTERHOFF, G. P. Um update of research needs for water reuse. In: **Water Reuse Smposium**, 3, 1984. San Diego, Califórnia, Proceeding, p. 1721-42.

WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME (UNITED NATIONS). **Water for People, Water for Life: A Joint Report by the Twenty-three UN Agencies Concerned with Freshwater**. Unesco, 2003.

WHO - World Health Organization. **Guidelines for Drinking-Water Quality**. Geneva, 2004.

WU, J.; LE-CLECH, P.; STUETZ, R. M.; FANE, A. G. & CHEN, V. Effects of relaxation and backwashing conditions on fouling in bioreactor. **Journal of Membrane Science**, v. 324, n 1-2, p. 26-32, 2008.

XING, C. H.; TARDIEU, E.; QIAN, Y.; WEN, X. H. Ultrafiltration membrane bioreactor for urban wastewater reclamation. **Journal of Membrane Science**, v.177, n.1, p.73-82, 2000.